

COLLECTION
LE COURS
DE MECANIQUE

**S. Bensaada
D. Feliachi**

La Maintenance Industrielle



OFFICE DES PUBLICATIONS UNIVERSITAIRES
1, Place centrale de Ben-Aknoun (Alger)



**S. Bensaada
D. Feliachi**

La Maintenance Industrielle



OFFICE DES PUBLICATIONS UNIVERSITAIRES
1, Place centrale de Ben-Aknoun (Alger)

© OFFICE DES PUBLICATIONS UNIVERSITAIRES: 07 - 2002

EDITION: 2.05.4463
I.S.B.N : 9961.0.0565.1
Dépôt légal : 1108/2002

PROGRAMME PEDAGOGIQUE DU MODULE T.E.C. 336

LA MAINTENANCE INDUSTRIELLE

1. La maintenance

- 1.1. Importance de la maintenance dans l'entreprise
- 1.2. Objectifs de la maintenance dans l'entreprise
- 1.3. Politiques de la maintenance dans l'entreprise

2. Organisation de la maintenance

- 2.1. Place de la maintenance dans la structure générale
- 2.2. Organisation interne
- 2.3. Moyens mis en oeuvre
 - 2.3.1. Moyens matériels
 - 2.3.2. Moyens de gestion
 - 2.3.3. Moyens humains

3. Méthodes et techniques de la maintenance

- 3.1. Maintenance de catastrophe, ou de réparation ou curative
- 3.2. Maintenance de la routine (entretien courant)
- 3.3. Maintenance Planifiée (ordonnancement, délais, planning)
- 3.4. Maintenance préventive
- 3.5. Technique analytique d'amélioration

4. Dossiers machines

- 4.1. Dossier historique
- 4.2. Fichiers d'entretien machine et installations
- 4.3. Gamme de graissage

5. Les différents types de graisses et d'huiles

- 5.1. Les types de graisses
- 5.2. Les types d'huiles
- 5.3. Les types de lubrifiants

6. Coût des interventions

- 6.1. Coût de la pièce de rechange (PR)
- 6.2. Coût des heures d'immobilisation
- 6.3. Ratios de maintenance

7. Maintenance et sécurité de travail

- 7.1. Sécurité
- 7.2. Hygiène

TABLE DES MATIERES

Page N°

AVANT-PROPOS	
1. GENERALITE SUR LA MAINTENANCE	1
1.1. Introduction	1
1.2. Importance de la maintenance dans l'entreprise	2
1.3. Objectifs de la maintenance dans l'entreprise	3
1.4. Politiques de la maintenance dans l'entreprise	5
1.4.1. Mise en œuvre de politique de maintenance rationnelle	10
2. ORGANISATION DE LA MAINTENANCE	14
2.1. Place de la maintenance dans la structure générale	14
2.2. Organisation interne de la maintenance	16
2.2.1. Implantation du service	18
2.2.2. Algorithme des tâches d'un service maintenance	19
2.2.3. Structures	19
2.2.4. Planification	20
2.2.5. Etudes et méthodes (Préparation du travail)	21
2.2.6. Fiche de préparation	22
2.2.7. Ordonnancement et lancement	24
2.2.8. Ordre de travail	29
2.2.9. Réalisation	30
2.2.10. Fichier historique	31
2.2.11. Statistiques - Ratios	32
2.3. Moyens humains	35
2.3.1. Politique des besoins.....	36
2.3.2. Structures	36
2.3.3. Niveau des effectifs	37
2.3.4. Formation	38
2.3.5. Exemple de fonctions qu'il aura à assumer un technicien en maintenance	39
2.4. Moyens matériels	42
2.4.1. Outillage	43
2.4.2. Equipements supports	43
2.4.5. Pièces de rechange	43
2.4.6. Le stockage	44
2.4.7. Consommation constante	45
2.4.8. Consommation aléatoire	46
2.4.9. Méthode de gestion A.B.C.	47
3. LA DISPONIBILITE ET LES CONCEPTS : F.M.D.	50
3.1. La fiabilité	51
3.1.1. Définition de la fiabilité	51

3.1.2. Application	55
3.1.3. Aspects probabilistes	58
3.1.4. Définition théorique	62
3.2. La maintenabilité	64
3.3. La disponibilité	65
3.3.1. Objectif économique	65
3.3.2. Obstacles économiques	66
3.3.3. Obstacles humains	67
3.3.4. Obstacles techniques	67
3.4. Notions de F.M.D.	68
3.4.1. Première étape : l'analyse mission	69
3.4.2. Deuxième étape : l'analyse qualitative	69
3.4.3. Troisième partie : l'analyse quantitative	70
3.5. Coûts et analyse d'une politique F.M.D.	72
3.5.1. Coûts	72
3.5.2. Avantages	72
4. METHODES ET TECHNIQUES DE LA MAINTENANCE	73
4.1. Généralités.....	73
4.2. Les méthodes de maintenance	74
4.2.1. La maintenance corrective.....	76
4.2.2. La maintenance préventive systématique	77
4.2.3. La maintenance préventive conditionnelle	81
4.3. Les opérations de maintenance	89
4.3.1. Le dépannage	89
4.3.2. La réparation	89
4.3.3. Les inspections	89
4.3.4. Les visites	90
4.3.5. Les contrôles	90
4.3.6. Les révisions	90
4.4. Les activités connexes de la maintenance	91
4.4.1. La maintenance d'amélioration	91
4.4.2. La rénovation	91
4.4.3. La reconstruction	92
4.4.4. La modernisation	92
4.5. Les travaux neufs	92
4.6. La sécurité	92
5. DOSSIER MACHINE ET DOCUMENTATION TECHNIQUE	94
5.1. But de la documentation	94
5.2. Dossier machine	95
5.2.1. Fiche technique	96
5.2.2. Dessin technique	97

5.2.3. Nomenclature des pièces de rechange	97
5.2.4. Fiche d'entretien	98
5.2.5. Historique des équipements	99
6. COUTS DE LA MAINTENANCE	94
6.1. Composition des coûts	100
6.2. Analyse des coûts et méthode ABC	102
6.3. Entretien préventif optimal	103
6.4. Exemple de calcul de la MTBF	105
6.5. Optimisation du remplacement par l'utilisation du modèle des probabilités	106
7. REMPLACEMENT D'EQUIPEMENTS	94
7.1. Choix entre le maintien et le remplacement	110
7.2. Durée de vie économique	110
7.3. déclassement de matériel	114
8. LA MAINTENANCE PREDICTIVE BASEE SUR LES VIBRATIONS MECANQUES	118
8.1. Généralités	118
8.2. Analyse vibratoire	118
8.3. Origine des vibrations	120
8.4. Nature des vibrations	121
8.4.1. Les vibrations périodiques	122
8.4.2. Les vibrations transitoires	122
8.4.3. Les vibrations aléatoires	123
8.5. Paramètres de vibrations	125
8.6. Prise de mesure dans les machines tournantes	125
8.6.1. Lieux de fixation des capteurs	125
8.6.2. Utilisation des vibrations relatives-déplacements.....	126
8.6.3. Mesure des vibrations absolues-accélération	126
8.7. Représentation du signal vibratoire	127
8.7.1. La représentation spectrale ou fréquentielle	127
8.7.2. Représentation vectorielle	128
8.7.3. Représentation temporelle	128
8.8. Méthodes d'étude des vibrations	129
8.8.1. Mesure de la valeur globale	130
8.8.2. Technique de résonance	134
8.8.3. Analyse spectrale	135
8.8.4. Techniques spécifiques	142
8.9. Chaîne de mesure, matériel	145
8.9.1. Les capteurs	145
8.9.2. Les enregistreurs	145
8.9.3. Les analyseurs	146
9. LA LUBRIFICATION	148

9.1. Généralités sur la protection contre l'usure adhésive	148
9.1.1. Conception technologique	149
9.1.2. Interposition du film lubrifiant	149
9.2. La lubrification	150
9.3. Lubrification à l'huile	150
9.3.1. Choix de la lubrification à l'huile	150
9.3.2. La viscosité	151
9.3.3. Pouvoir séparateur du lubrifiant	152
9.3.4. Théorie élasto-hydrodynamique : EHD.....	152
9.3.5. Quantité et qualité d'huile	155
9.4. La lubrification à la graisse	155
9.4.1. Choix de la graisse	155
9.4.2. Mise en œuvre	156
9.4.3. Périodicité de graissage	156
10. EFFICACITE DANS L'ORGANISATION	
DE LA GESTION EN MAINTENANCE	158
10.1. Niveaux de maintenance	158
10.2. Gestion des pièces de rechange en maintenance	160
10.3. Plan d'actions en maintenance	162
10.4. Liaison entre la maintenance et la production	164
10.5. Indicateurs de maintenance	167
10.5.1. Taux brut de fonctionnement	170
10.5.2. Taux de performance	170
10.5.3. Taux de qualité	171
11. L'INFORMATIQUE ET LA MAINTENANCE	172
11.1. Généralités	172
11.2. Nécessité de l'outil informatique	172
11.2.1. Objectifs à caractères économiques	173
11.2.2. Objectifs à caractères techniques	173
11.2.3. Objectifs à caractères humains	173
11.3. Spécificités	174
11.4. Modèle d'organisation des données	174
11.5. Maintenance assistée par ordinateur	177
11.6. Systèmes experts	178
12. LA MAINTENANCE ET LA SECURITE DE TRAVAIL	180
12.1. Généralités	180
12.2. Règles de base de la sécurité	181
12.3. Les accidents de travail et maladies professionnelles	183
12.4. Organisation de la sécurité au sein de l'entreprise	183
12.5. Causes des accidents et maladies professionnelles	185
12.6. La sécurité à l'atelier mécanique	187
12.7. La sécurité à l'atelier électrique	191

12.8. La sécurité à l'atelier de soudage	192
ANNEXES	193
Annexe N°01 : Fiche technique	194
Annexe N°02 : Nomenclature des pièces de rechange	195
Annexe N°03 : Fiche entretien	196
Annexe N°04 : Fichier historique (Récapitulatif)	197
Annexe N°05 : Demande de travaux	198
Annexe N°06 : Fiche de préparation-Ordre de travail	199
Annexe N°07 : Rapport intervention	200
Annexe N°08 : Fiche de suivi principaux équipements	201
Annexe N°09 : Fiche analytique du personnel	202
BIBLIOGRAPHIE	203

Cela n'empêche nullement les hommes de maintenance du secteur industriel de s'en servir pour adapter et aménager au mieux leur capital expérience dans ce domaine conformément à leurs propres conditions technologiques car une bonne organisation de la gestion devrait permettre d'adopter les moyens aux besoins.

Nous nous excusons des répétitions qui pourraient apparaître ou des confusions qui vous sembleraient inefficaces. Par souci de ne pas omettre certaines idées capitales, quelques passages seront peut être tant bien que mal rédigés, d'une manière implicite et pourront ainsi être critiqués. Cependant il suffirait d'en détenir juste le principal vecteur pour pouvoir intégrer la notion mère.

L'approche globale en est déterministe, et sans nul doute, permettra aux technologues que nous sommes, avec bien entendu l'effort voulu, d'organiser la gestion de la fonction maintenance, pouvoir planifier et estimer les gains dans le sens d'amélioration des conditions de travail et rationaliser la gestion pour être en mesure de "s'auto-normaliser" avec des références propres et fondées au fil de notre expérience.

L'implication des hommes avec leur savoir scientifique demeure et demeurera l'indice attractif majeur et la dimension portante de réussite malgré la sophistication et le développement sans limite de l'outil informatique et des systèmes experts.

Nous nous permettrons de conclure sans pour autant achever pour énoncer qu'il n'est pas de rigueur de pouvoir "dompter" facilement les machines industrielles.

Ce qui est probant c'est de pouvoir en progresser continuellement afin d'approcher les limites technologiques tant sur le plan fabrication que préservation de l'outil de production en adaptant au mieux et à juste valeur des politiques rationnelles.

Cela se traduit par des ordres de ce qu'il faudrait faire faire par autrui et ajuster continuellement les décisions de manière à atteindre chaque fois les objectifs préalablement établis.

AVANT - PROPOS

Les technologues qui ont prévalu, en ce fin de siècle, par leur génie humain n'arrivent toujours pas, tout compte fait, à réaliser des machines parfaites, idéales c'est à dire sans usure aucune, au sens où elles ne nécessiteraient pas d'entretien et à des prix relativement raisonnables tout en assurant la sécurité au sens large et la sécurité dans le fonctionnement par une disponibilité illimitée sous l'effet d'une optimisation accrue.

D'où un corrolaire s'énonce de la manière suivante : toute machine destinée à remplir une fonction, généralement de production ou d'exploitation, devrait être impérativement entretenue. Cela se traduit par des actions d'interventions humaines pour corriger, vérifier et s'assurer de la continuité du fonctionnement et mettre à jour les caractéristiques initiales.

Ces actions sont matérialisées par le concept maintenance qui les rationalisent pour pouvoir assurer en permanence le déficit "disponibilité quasi permanente dans les conditions pour lesquelles la machine est destinée au moindre coût possible"

Le concept maintenance préféré du syntagme entretien n'est autre que la corrélation de quelques notions, le plus souvent élémentaires du point de vue scientifique.

A cet effet, nous avons essayé à travers cet exposé d'idées directrices, de concepts de base, d'initier et familiariser les élèves ingénieurs de technologie des fondements d'approches et réflexions en maintenance industrielle dans toute sa dimension tant technique que gestion, que domaine appelé encore à se développer continuellement de part son application spécifique dans des conditions pratiques particulières.

Outre l'objectif premier revêtant l'aspect pédagogique et didactique envers les futurs ingénieurs et techniciens de technologie, les notions exposées, les réflexions édictées trouvent leur amorce et leur application dans les milieux industriels.

Les étapes d'apprentissage de savoir faire sont inévitables et coûteuses pour simuler et pratiquer les modèles de maintenance avancée tel que l'exemple Japonais qui tend vers "la maintenance avec le zéro panne et le zéro stock".

Ceci pourrait dans une certaine mesure aider à doubler de vitesse à travers les systèmes experts en associant tous les potentiels de l'entreprise afin que la maintenance sera réhabilitée et aura ses titres de noblesse de part sa place non pas fataliste d'un mal nécessaire mais comme une fonction stratégique de l'entreprise.

LES AUTEURS

1. GENERALITES SUR LA MAINTENANCE

1.1. Introduction

Les installations, les équipements tendent à se détériorer dans le temps sous l'action de causes multiples telles que usures, déformations dues au fonctionnement, et ou action des agents corrosifs (agents chimiques, atmosphères,...).

Ces détériorations peuvent provoquer l'arrêt de fonctionnement (panne), diminuer les capacités de production, mettre en péril la sécurité des personnes, provoquer des rébus ou diminuer la qualité, augmenter les coûts de fonctionnement (augmentation de la consommation d'énergie etc.) diminuer la valeur marchande des ces moyens.

Dans tous les cas, les détériorations engendrent des coûts directs ou indirects supplémentaires. Maintenir c'est donc effectuer des opérations de dépannage, graissage, visite, réparation, amélioration etc. qui permettent de conserver le potentiel du matériel pour assurer la continuité et la qualité de la production bien maintenir c'est aussi assurer les opérations au coût global optimum.

Mais aujourd'hui, maîtriser la disponibilité des biens matériels (industriels) permettrait à l'industrie d'agir sur la régularité de sa production, sur ses coûts de fabrication, sur sa compétitivité et sur son succès commercial.

Pour vendre plus, pour vendre mieux, il s'agit à présent non plus seulement de proposer un meilleur mode de conduite de l'installation mais de garantir à l'exploitant un mode d'intervention rapide, une mise en place de détection et de diagnostic de défaillances, en un mot une maintenance de qualité permettant d'atteindre la production optimum.

Cependant cette amélioration de la disponibilité des machines, impératif d'aujourd'hui, ne doit pas entraîner une inflation du budget de maintenance déjà bien lourd dans beaucoup d'industries, sous peine d'en amoindrir l'intérêt.

Les entreprises sont donc confrontées à ce double défi économique :

- augmenter la productivité par une disponibilité accrue de leur outil de production
- diminuer les coûts d'entretien et de réparation.

1.2. Importance de la maintenance dans l'entreprise

Pendant longtemps, la maintenance est considérée par les gestionnaires plus comme une fatalité qu'un ensemble d'activités ayant pour but d'accomplir toutes les tâches nécessaires pour que l'équipement soit maintenu ou rétabli dans un état spécifié ou en mesure de :

- permettre une exécution normale des opérations dans les meilleures conditions de coûts, de sécurité et de qualité (le cas de la production)
- obtenir un service dans les meilleures conditions de confort et de coût (c'est le cas des services vendus en général mais surtout des transports, des hôpitaux).

Donc pour nous, entretenir, consiste à dépanner, réparer, réaliser des opérations préventives dont le but principal est d'assurer le fonctionnement de l'outil de production. D'une manière globale entretenir c'est subir.

Outre cela le progrès technologique ainsi que l'évolution de la conception de la gestion des entreprises ont fait que la maintenance est devenue de nos jours une fonction importante de l'entreprise dont la direction exige l'utilisation de technique précises et dont le rôle dans l'atteinte des objectifs de l'entreprise est loin d'être négligeable.

Donc la fonction maintenance est l'affaire de tous et doit être omniprésente dans les entreprises et les services. Elle est devenu un enjeu économique considérable pour tous les pays qui souhaitent disposer d'outils de production disponibles, performants.

Si l'entretien ne se traduisait que par des interventions, nous pouvons dire que la maintenance est tout autre chose . C'est d'abord un état d'esprit,

une manière de penser, ensuite une discipline nouvelle dotée de moyens permettant d'intervenir dans de meilleures conditions, d'appliquer les différentes méthodes en optimisant le coût global . La maintenance vise à éviter les pannes et les temps morts que celle-ci entraînent .

La maintenance ne doit pas être perçue comme une fonction secondaire et elle doit bénéficier de toute l'attention voulue.

Actuellement la modernisation de l'outil de production impose une évolution fondamentale dans le domaine de maintenance. Cette évolution se traduit par un changement profond pour les entreprises (remplacement de la fonction entretien par la fonction maintenance), par une évolution de mentalités.

Cette mutation nécessite des structures nouvelles, des moyens nouveaux et pour le personnel un état d'esprit " Maintenance".

En plus de ce qui a été dit, le terme de maintenance désigne plusieurs catégories de travaux notamment :

- surveillance et travaux simples (graissage etc.) généralement dévolus aux utilisateurs du matériel ou des installations
- contrôle de fonctionnement et travaux plus complexes que les précédents, souvent effectués par spécialistes
- dépannage et réparation en cas d'incident confiés à des ouvriers ou équipes spécialisées
- entretien systématique comportant des révisions partielles ou totales, faites sur place ou dans un atelier spécialisé
- reconstruction complète de machines ou d'installations, constituant une véritable remise à neuf

1.3. Objectifs de la maintenance dans l'entreprise

Notre pays a investi d'énormes capitaux dans le secteur industriel depuis déjà de longues années. La maintien des équipements et des outils de production ainsi que leur fiabilité demeurent très aléatoires et non maîtrisables. Le résultat escompté n'a pas été atteint faute de traditions et de

La négligence de cette fonction et parfois même l'oubli de ce concept n'ont fait qu'accentuer la situation et l'état de notre industrie. Ainsi la production subissant trop de charges demeure très coûteuses et non rentable.

La maîtrise dans la pratique d'une maintenance gérée rationnellement pourra soulager notre industrie. Le problème étant de savoir dans quelle mesure cela est possible et couramment renforcer la gestion dans l'approche d'une fonction maintenance plus adéquate répondant à nos propres conditions industrielles. Il faudrait oser investir dans une gestion rationnelle de politique de maintenance car et la théorie et la pratique le confirment.

La seule façon de rationaliser les coûts des produits industriels: c'est gérer. La gestion est une action, une manière de faire fonctionner suivant une certaine ligne de conduite déterminée préalablement.

Entretenir au jour le jour d'une manière aléatoire est l'optique des constructeurs et ou fournisseurs d'équipements industriels qui ne cessent d'avoir des relations commerciales vers notre pays. D'où l'objectif de la maintenance est de conserver les équipements, installations ou autres éléments de l'actif dans des conditions qui facilitent l'atteinte des buts que s'est fixée l'entreprise.

Ceci ne signifie pas pour autant et nécessairement que tout devrait fonctionner de façon absolument parfaite, ni que toutes les pièces des équipements doivent être toujours neuves de façon à ce que les pannes n'arrivent jamais. Ce serait d'ailleurs irréalisables d'un point de vue pratique.

Si la maintenance est impliquée dans le processus de gestion de l'appareil de production pour assurer la continuité et la qualité de la production avec un coût minimum, dans ce cas, il s'agit alors d'améliorer à la fois la fiabilité des équipements et de réduire les temps de réparations.

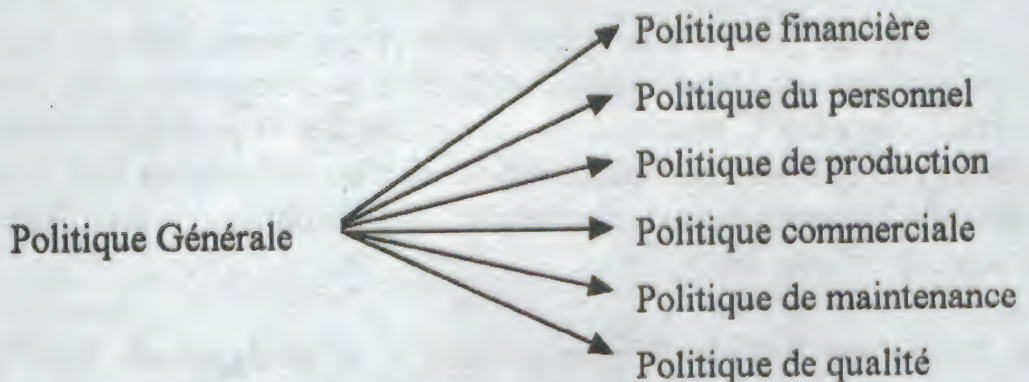
Le critère dominant devient alors la minimisation non plus du coût de défaillance qui est constitué par le coût de maintenance occasionnée par une panne, mais le coût de cette panne en terme d'arrêt de production (manque à gagner).

1.4. Politiques de la maintenance dans l'entreprise

Dans nos entreprises, le service entretien est peu important , il est souvent négligé et limitée à un entretien fortuit par des dépannages et des réparations accidentelles. Il demeure toujours un service secondaire, limité par un très faible personnel d'exécution encadré par une maîtrise travaillant au jour le jour sans prévision, sans budget propre et plus encore sans connaître ses dépenses propres qui sont rattachées aux frais généraux de l'entreprise.

Actuellement, toute intervention de maintenance à besoin, comme tout processus de fabrication d'être pensée avant d'être réalisée. Pour cela, le service maintenance doit impérativement solliciter une organisation des moyens à mettre en oeuvre pour la réussite de ses tâches afin de pratiquer harmonieusement les différents types d'entretien.

Dans une entreprise , il existe plusieurs politiques:



Vu que la maintenance exige une combinaison rationnelle des moyens et qu'elle est permanente, elle nécessite une politique d'entretien préalablement établie. En général la politique c'est « l'art de gouverner », mais la politique de la maintenance c'est de définir au niveau de l'entreprise des objectifs technico-économiques relatifs à la prise en charge des équipements par le service de maintenance.

C'est dans le cadre de cette politique que le responsable du service de maintenance met en oeuvre les moyens adaptés aux objectifs fixés, ou parlera alors de stratégie pour le moyen terme et de tactique pour le coût terme .

Dans cette politique on tient compte de la gestion de maintenance qui prend essentiellement en compte les aspects technique, économique et financier des différentes méthodes utilisables (corrective, préventive etc.) en vue d'optimiser la disponibilité des matériels.

Dans cette politique on doit s'attacher à la prévision des pannes aléatoires pour les études d'inspection (entretien suivant diagnostic), faites à partir de relevés méthodiques et périodiques.

On étudie la vie du matériel sur plusieurs années . Ces études de fiabilités vont servir à la détermination des probabilités de pannes, donc à la consommation des pièces détachées et des différentes charges. Ce n'est qu'à partir de ces données qu'on peut élaborer les prévisions et le budget de maintenance.

Avec une politique de maintenance et une bonne stratégie on ne subit plus la panne car elle est prévue et le contrôle budgétaire reste un contrôle normal, car dans la stratégie, on aura à calculer la probabilité d'apparition des pannes et leurs conséquences pour ne plus les subir et l'on cherchera à rentabiliser toute action d'entretien. D'où la maintenance sera donc amenée à considérer alors les :

- **Prévisions à long termes** : liées à la politique de l'entreprise et permettant l'ordonnancement des charges, des stocks, des investissements en matériel.
- **Prévisions à moyen terme** : la volonté de maintenir le potentiel d'activité de l'entreprise conduit à veiller à l'immobilisation des matériels à des moments qui perturbent le moins possible la programme de fabrication. Des lors il faut fournir nécessairement et suffisamment tôt le calendrier des interventions de maintenance. Celle-ci ayant une influence sur l'ordonnancement des fabrications.

- **Prévisions à court terme** : dans ce cas le service de maintenance s'efforcera de réduire les durée d'immobilisation du matériel et les coûts de ses interventions. Sachant que les réductions des coûts et d'immobilisation ne sont possibles que si le matériel et les interventions ont fait l'objet d'une étude préalable, il est donc nécessaire de préparer le travail et d'étudier les conditions de fonctionnement , les défaillances possibles et les conditions d'exécution des interventions. Le service technique lié à cette fonction doit fournir toutes les informations qualitatives et quantitatives susceptibles d'influencer les politiques particulières de l'entreprise.

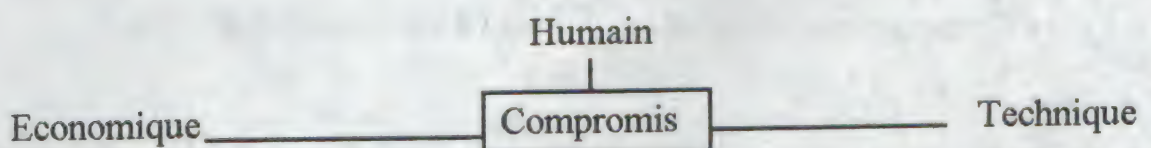
La gestion de la politique de maintenance préalablement établie ne doit pas se reposer uniquement sur l'aspect financier, si non elle aura pour but de réduire au minimum les coûts de maintenance sans trop se soucier de l'intérêt majeur de l'entretien, car on cherche toujours à ne trop dépenser dans le cadre d'un exercice déterminé ce qui donne la conception selon laquelle l'entretien coûte et rapporte rien en oubliant que sans entretien, on ne peut pas produire.

Généralement le budget affecté au service de maintenance (budget empirique) est annuel et fonction des dépenses antérieures.

Il est préparé à partir de l'analyse d'observation des différents éléments réunis dans le passé (base statistique) et dans le courant de l'année précédente et pour une date déterminée .

Une conjoncture différente peut le remettre en cause car ses objectifs sont essentiellement financier.

La politique implique la prise de décision sous forme de compromis entre les 3 pôles:



a) - Exemples de politique de maintenance

1. Accroître la disponibilité des matériels de production
2. Réduire les coûts de maintenance des matériels de production
3. Permettre une production de haute qualité
4. Diminuer les pertes de production
5. Augmenter la productivité du personnel de maintenance
6. Réduire les stocks liés à la maintenance
7. Améliorer l'efficacité de l'ordonnancement (moins d'improvisations)
8. Définir une politique d'approvisionnement
9. Définir les conditions de renouvellement ou d'investissement
10. Définir une politique de recours à des entreprises extérieures
11. Optimiser la réparation entre la maintenance corrective et la maintenance préventive.
12. Choisir la méthode de maintenance la mieux adaptée à un matériel donnée.

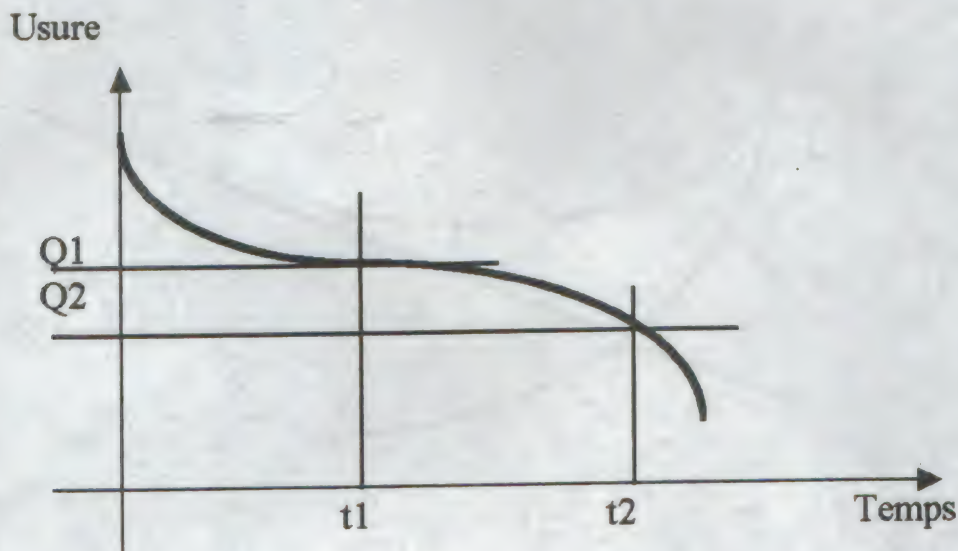
b) - Une fois un objectif clairement défini, et en se limitant au domaine de la maintenance opérationnelle, nous devons encore raisonner en terme de choix.

- Quelle méthode mettre en oeuvre ?
 - préventive ou corrective ?
 - quel niveau de maintenance préventive ?
 - quelle forme de maintenance préventive ?
 - à quelle périodicité intervenir ?
- Quand remplacer un équipement ?
- Quand faut-il cesser la maintenance ?
- Comment introduire une politique de maintenance efficace ?

c) - Exemples de « paramètres » impliquant la définition d'objectifs du domaine de la politique de maintenance

1 - Fixer un seuil d'admissibilité de dégradation Q : (figure1)

- Privilégier la qualité par le choix du niveau Q1.
- Réduire les coûts directs en intervenant moins souvent par le choix du niveau Q2.



(Figure 1)

2 - Période d'intervention systématique (T)

Si cette période est modélisée par (T) nous avons : $T = k \times \text{M.T.B.F.}$

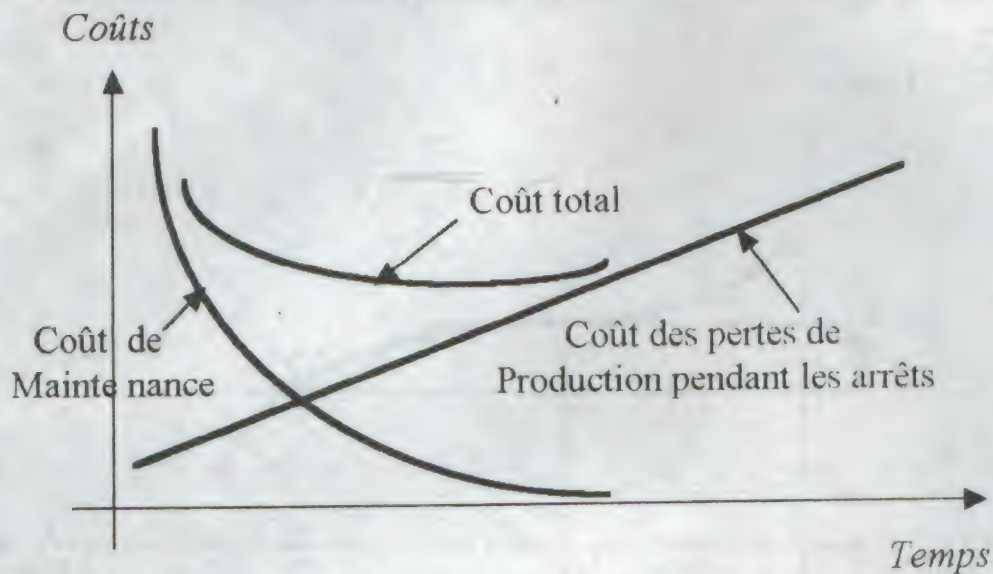
Du choix de k (coefficient réducteur) dépendent : des interventions préventives plus ou moins nombreuses, des consommations de pièces de rechange plus ou moins importantes, des pannes résiduelles plus ou moins fréquentes.

MTBF : Temps moyen entre pannes (Mean Time Between Failures)

3 - Risque α associé à une fiabilité

Il met en jeu une plus ou moins grande sécurité de fonctionnement (suivant l'objectif).

4 - Choix d'une politique en fonction des coûts (figure 2)



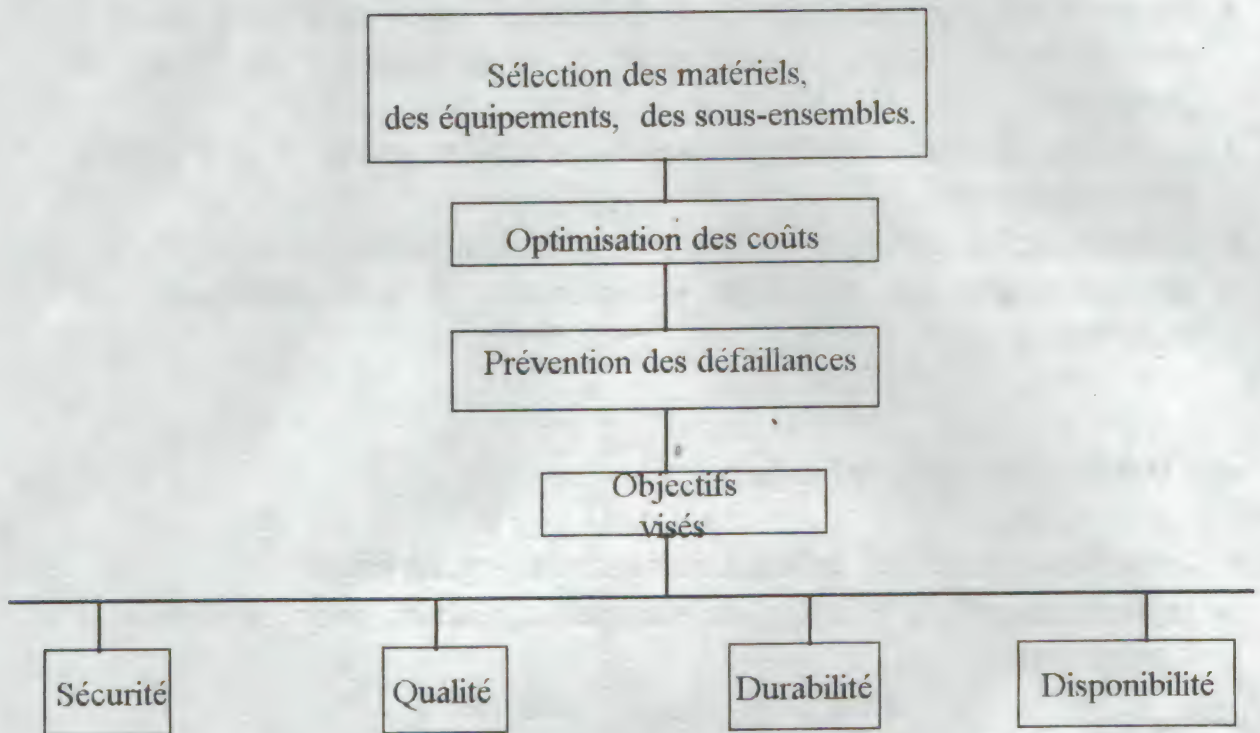
(Figure 2)

1.4.1. La mise en oeuvre d'une politique de maintenance rationnelle

Sachant que les responsables opérationnels n'ont pas le pouvoir de définir la politique, nous pouvons dire qu'elle relève de décisions de Direction Générale.

Un certain retard a été pris dans ce domaine, trop peu de directions sont informées de l'existence d'outils d'aide à la décision ou de l'élaboration de doctrines permettant la réalisation d'une maintenance efficace et économique.

Une politique de maintenance peut s'articuler et s'organiser autour des concepts suivants:



Ce contact implique des moyens définis, compris, admis et réalisables par l'équipe de maintenance.

1.4.1.1. Les conditions nécessaires à sa mise en oeuvre

La mise en place d'une politique de maintenance implique :

a) - une volonté et une bonne compréhension de la Direction générale

- idée claire de la fonction maintenance, de ses possibilités, de ses limites
- participation à la définition des objectifs et dotation des moyens correspondants
- admettre la nécessité d'un investissement initial
- exprimer la volonté de maintenir ou rétablir le matériel dans un état spécifié.

b) - Des structures compatibles avec la fonction maintenance

- équilibre structurel des 3 fonctions techniques : pour un produit donné il faut assurer : l'étude, la production et la maintenance de l'outil de production.
- centralisation dans un atelier spécialisé des moyens lourds (4^e et 5^e niveau de maintenance)
- décentralisation sur site d'équipes techniquement polyvalentes
- développement des fonctions « méthodes et ordonnancement de maintenance »

c) - Dotation en moyens humains

- compétence en gestion de la maintenance de l'encadrement
- revalorisation de la fonction maintenance et réaction contre la routine et l'empirisme :

subir	→	maîtriser
improviser	→	prévoir

- consensus du personnel
- formation du personnel en place et introduction si possible de personnel nouveau;
- effectif suffisant

d) - Dotation en moyens financiers

- suffisance du budget face aux objectifs visés
- possibilité d'investissement

Exemple : mise en place d'une maintenance conditionnelle, installation de télésurveillance du matériel, informatisation.

e) - Dotation en moyens matériels

- équipement de l'atelier central

- outillage standard et spécialisé adapté au matériel, moyens scientifiques de surveillance, détection, test, auto diagnostic
- moyens informatisés.

f) - Maîtrise des flux de communication

- les techniques d'information et de communication
- les dossiers (techniques, historiques de pannes)
- exploitation des données opérationnelles : fiabilité, disponibilité, coûts) .

2 - ORGANISATION DE LA MAINTENANCE

2.1. Place de la maintenance dans la structure générale

Actuellement toute intervention d'entretien à besoin, comme tout processus de fabrication d'être pensé avant d'être réalisée, pour cela le service de maintenance doit impérativement solliciter une organisation des moyens à mettre en oeuvre pour la réussite de ses tâches afin de pratiquer harmonieusement les différents types d'entretien.

Il existe deux tendances quant au positionnement de la maintenance dans l'entreprise :

- La centralisation où toute la maintenance est assurée par un service
- La décentralisation, où tout le service de maintenance est dépossédé de certaines responsabilités ; c'est généralement la maintenance de fabrication qui passe sous le contrôle des services de production et de fabrication.

Le service central de maintenance peut, à la demande des services ci-dessus prêter à ceux-ci son atelier et, ou du personnel pour l'accomplissement de certains travaux.

L'objet de la décentralisation est de mieux cerner les frais réels de maintenance par postes de travail.

Son inconvénient est de conduire à l'application de plusieurs politiques de maintenance éventuellement contradictoires.

Dans les deux cas, le service de maintenance dépendra hiérarchiquement de la direction de l'entreprise ou d'une direction technique, mais il est nécessaire, pour que les équipements fonctionnent en toute performance, d'étoffer la maintenance. Ce service doit être décentralisé (indépendant), posséder son propre budget et le gérer lui-même parce que, de par son importance, il représente des dépenses très lourdes qu'on doit connaître et bien dissocier des frais généraux, sans cela, les pertes de

production en cas de défaillance seront imputables à des insuffisances du service entretien.

Outre cela, il est nécessaire et impératif de connaître les frais réels de l'entretien par entité matérielle ou prestation fournie pour pouvoir agir soit sur les facteurs budgétaires, soit sur les facteurs technologiques afin d'optimiser l'indice d'efficacité de l'entretien.

La crise économique omniprésente, la rigueur s'installe dans tous les services mais surtout dans les services non productif.

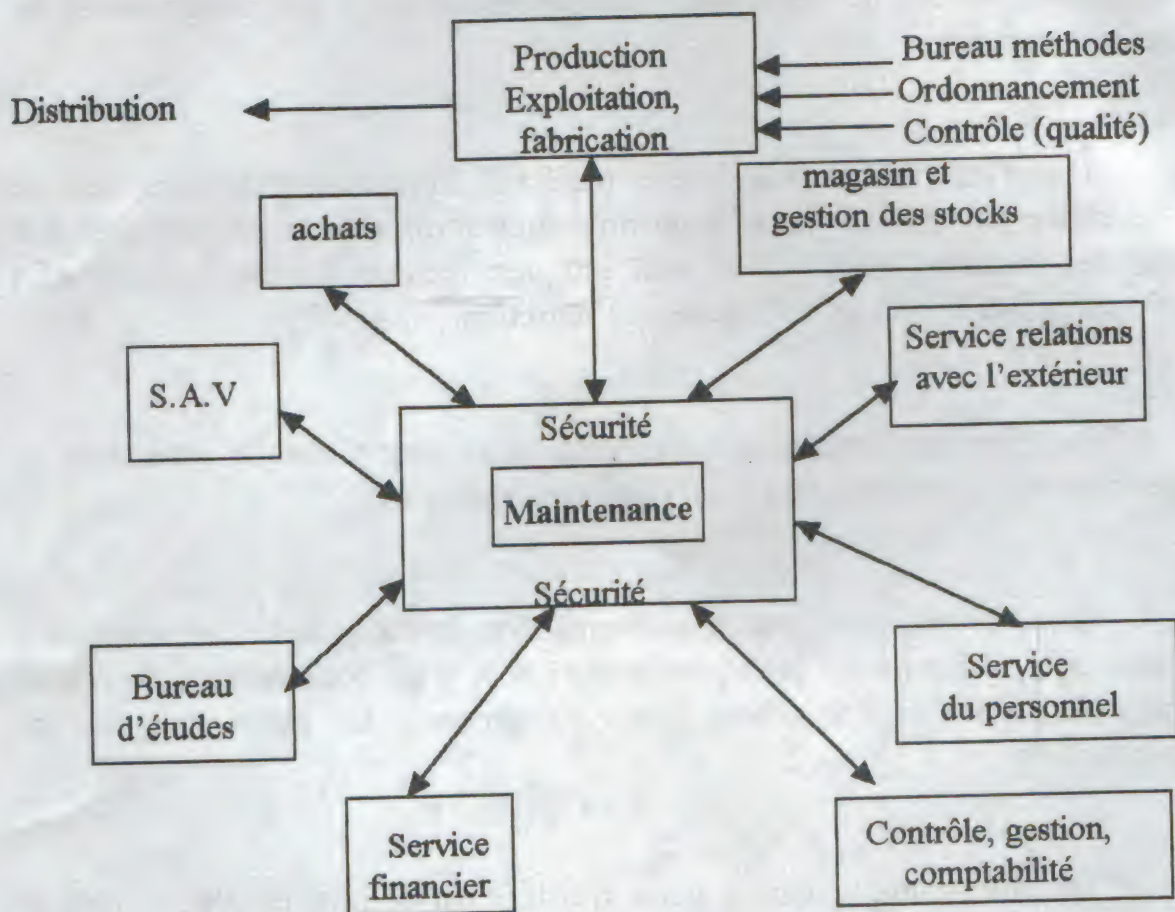
Nous savons aussi que la modernisation de l'appareil de production à pour effet d'augmenter les investissements et pour conséquence de rendre plus difficile l'amortissement donc d'augmenter les coûts de perte de production.

De plus, actuellement la vente d'usines est de plus en plus « clés en main » avec maintenance assistée.

Pour toutes les raisons la maintenance devra être de qualité.

Une maintenance de qualité passe obligatoirement par une bonne gestion, mais aussi par une approche nécessite un changement de mentalité, le « campagnon » d'hier bon dépanneur et très bon bricoleur doit laisser la place à un technicien polyvalent confirmé dont la préoccupation ne sera pas que l'immédiat mais traitera des problèmes en amont et définira la politique à mener en aval.

Le service de maintenance, comme le service de sécurité, devient une interface entre toutes les entités qui composent l'entreprise.



2.2. Organisation interne de la maintenance

Il est de plus en plus admis de nos jours que toute intervention d'entretien a besoin, comme tout processus de fabrication d'être pensée avant d'être réalisée. Bien sûr, il restera toujours les dépannages et imprévus, mais on peut dire que pratiquement 85 % des travaux de maintenance peuvent être planifiés, donc étudiés et préparés si l'organisation est correcte et les moyens suffisants.

“Un travail préparé est à moitié fait”, dit-on. En effet, il s'agit de préparer, d'une manière aussi complète que possible, tous les travaux de maintenance. Cet impératif nouveau dans l'organisation des services d'entretien a fait naître une structure fondamentale sur laquelle viennent s'appuyer toutes les autres structures de maintenance à savoir la préparation et les méthodes.

Cette nouvelle structure fonctionnelle a pour objectif premier la gestion de toute l'entité maintenance. Ses tâches sont : planification, organisation, coordination, Direction, Contrôle et évaluation.

Pour évaluer la situation de la maintenance et son efficacité à tout moment (nature, niveau, situation, coûts, ratios ...) et en tout lieu, la préparation du travail doit pouvoir répondre aux questions:

- Quoi faire ? (nature, buts visant la qualité du produit)
- Comment faire ? (procédés et modes opératoires)
- Qui va faire ? (qualification, formation, sécurité, ambiance de travail)
- Quand le faire ? (gestion des délais)
- Où le faire ? (emplacement , transport, engins)
- A quel prix ? (gestion des coûts)

Les objectifs assignés aux prestations de cette structure sont :

Sur le plan opérationnel

- Assurer aux installations un fonctionnement sûr, efficace et sécurisant
- Atteindre les capacités optimales de production
- Améliorer et maintenir le niveau de sécurité dans le travail
- Minimiser les temps d'intervention par la rapidité d'actions
- Optimiser la fiabilité du matériel en maintenance et garder les équipements dans les meilleures conditions possibles.

Sur le plan financier

- Optimiser les coûts d'entretien
- Réformer ou prendre des décisions pour les équipements dont le coût total de maintenance devient prohibitif (remplacement)
- Assurer la disponibilité maximale des équipements et installations
- Respecter les limites des budgets

2.2.1. Implantation du service de maintenance

L'implantation du service doit obéir en premier lieu au rassemblement et à la mémorisation de toutes les informations utiles concernant tous les moyens, qu'ils soient :

humains :

- profils
- compétences
- qualifications
- disponibilité

matériels :

- capacités
- documentation
- disponibilité

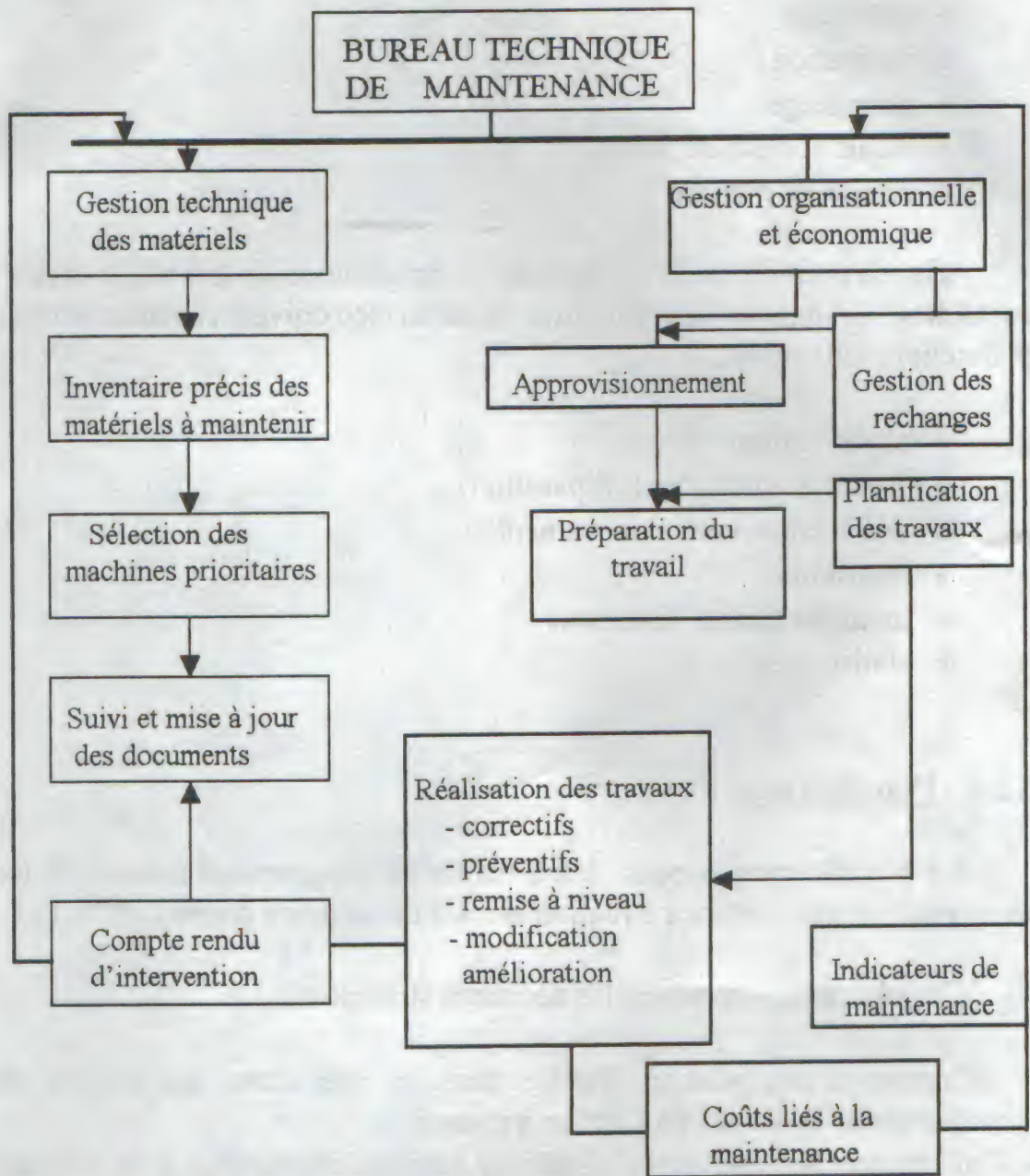
ou qu'ils se rapportent aux structures (relations fonctionnelles), aux systèmes (théorie, normalisation...) , ou aux supports et autres (bases de la gestion technico-administrative).

Ces données doivent être bien classées et organisées afin de faciliter la recherche de l'information voulue en temps voulu.

Pour qu'il y ait préparation, ce service doit pouvoir répondre à toute instruction de maintenance (fabrication, historique, standardisation, normes, ratios, sécurité ...) Nous avons déjà exposé les besoins en moyens humains, matériels et en documentation dans les chapitres précédents.

Les flux d'informations doivent tous être ordonnés par l'emploi de tableaux de bord, des ratios, des statistiques . Ils doivent, en un mot, être gérés de façon à ce qu'ils soient exploités ou stockés et exploitables

2.2.2. Algorithme des tâches d'un service maintenance



2.2.3. Structures

Pour avoir une idée d'une opération de maintenance et pouvoir l'analyser avant d'agir, nous allons énumérer les activités principales ou phases standards:

- arrêt de l'installation ou équipement

- démontage
- diagnostic (parfois le diagnostic se fait avant le démontage)
- nettoyage
- réparation
- remontage
- essais et mise au point
- remise en marche

Afin de pouvoir maîtriser la fonction préparation de travail, la division des tâches s'impose. Les structures de ce service doivent répondre à toutes les fonctions suivantes :

- planification
- études et méthodes (préparation)
- ordonnancement et lancement
- réalisation
- tenue du fichier historique
- statistiques

2.2.4. Planification

La planification a pour but d'établir les programmes annuels de tous les travaux de maintenance à réaliser durant un exercice donné .

Ces plannings expriment les décisions suivantes

définition d'une relation d'ordre dans les opérations qui doivent être réalisées sur les objets de l'action à mener;

- l'affectation des opérations à exécuter aux moyens destinés à les exécuter;
- le placement dans le temps de ces opérations

Ceci implique de réunir les conditions suivantes pour que ces programmes soient constitués utilement :

la définition claire des opérations à effectuer et des liaisons obligées et voulues entre ces opérations (consécutivité, simultanéité, recouvrement partiel ...)

- la définition des moyens nécessaires à l'exécution, moyens auxquels il faut faire appel et que l'on doit mobiliser ou rendre disponibles;
- la détermination des durées des opérations avec une précision suffisante.

En respectant tous ces éléments, la planification doit être en mesure de définir :

- le programme de maintenance préventive
- le programme des grands travaux
- les budgets alloués ou à obtenir.

Vu que 85 % des opérations d'entretien peuvent être planifiées, le programme annuel peut ainsi se formaliser. Les interventions non planifiées seront déclenchées en temps opportun.

Tout travail doit être demandé pour pouvoir être préparé et ensuite exécuté. A cet effet, on a recours à ce qu'on appelle la demande de travaux. Elle va décrire principalement les références du demandeur, celles de l'équipement concerné, l'état de l'équipement et la nature des travaux. Une partie sera réservée à la planification pour prendre note et donner suite à cette demande.

Il arrive que la demande exprime des travaux urgents, il y a donc lieu de classer les interventions selon des degrés d'urgence pour définir les priorités, par exemple :

- urgence A : nécessité absolue (arrêt de production)
- urgence B : panne importante qui cause l'arrêt de l'équipement et influe sur la production
- urgence C : panne secondaire où l'on peut temporiser

2.2.5. Etudes et méthodes (préparation du travail)

Toute intervention ou acte de maintenance demande une réflexion préalable sur les obstacles à surmonter. Une telle réflexion commence par une étude préliminaire des prestations à fournir. Elle continue ensuite par l'analyse profonde de la documentation technique et se complète par l'étude

des conditions particulières d'exploitation et de réalisation. Les objectifs à fixer sont :

- La rapidité dans l'intervention.
- la disponibilité des moyens nécessaires.
- le coût de remise en état.

Tout ceci pour assurer l'adéquation entre les besoins et les moyens, ce qui permet d'analyser en permanence les écarts entre prévisions et réalisations.

La fonction préparation consiste ainsi d'abord à réunir tous les documents nécessaires à la connaissance de l'état du matériel et du matériel lui-même (plans d'ensemble et de détail, dessins techniques, historiques, liste des pièces de rechange, ...).

Connaissant l'équipement, la préparation doit aussi connaître le comportement de celui-ci . Pour cela , elle procède par investigations méthodiques sous forme de diagnostics et expertises ou visites d'entretien ou inspections périodiques et rondes de contrôle . L'état du matériel étant mieux connu et confirmé, elle doit établir dans ses études et conseiller la meilleure variante d'entretien pour répondre aux impératifs de production . Ensuite, elle établit les gammes d'exécution des travaux retenus avec le souci permanent des conditions de : Besoins d'entretien, sécurité, qualité, délais, coûts.

2.2.6. Fiche de préparation

La préparation des travaux doit consister en la formalisation du travail par un dossier d'opérations très explicite qui contiendra tous les renseignements utiles à l'opération . Pour cela, une fiche de préparation du travail sera établie pour donner :

- le code du travail planifié
- le numéro de la demande de travaux
- la désignation de l'équipement concerné
- les codes équipement et localisation

- la nature des travaux à effectuer
- les services prestataires
- l'étude de l'opération et sa faisabilité
- la planification des tâches
- les documents nécessaires avec plans et schémas,
- la procédure de démontage, la prise de jeux, le réglage, le calibrage, l'étalonnage et le remontage avec tous les supports
- l'outillage nécessaire ordinaire et spécifique
- les moyens de manutention, de transports et les engins
- les pièces de rechange à prévoir ou kits de révision et les ingrédients
- la sécurité et les mesures à prendre
- les normes et standards

Ce dossier d'opérations, de préparation des prestations doit être adressé à l'ordonnancement pour l'exploiter et établir l'ordre de travail. Cette même fiche de préparation du travail pourra être utilisée aussi comme ordre de travail.

Cependant, dans les grandes entreprises, les fonctions étude, préparation et méthodes peuvent être dissociées. Le partage des missions se fera comme suit :

Etudes

- recherche, développement et politique
- méthodes de travail et moyens
- mesures du travail
- normes et standards

Préparation

- documentation
- gammes et instructions
- main d'oeuvre, outillage, pièces de rechange et ingrédients
- suivi des travaux et évaluation

Méthodes

- concevoir des éléments et outils destinés à la préparation (standards, barèmes, nomenclature, ratios ...)
- évaluation de l'activité
résolution de problèmes scientifiquement (aspect d'industrialisation) se basant sur l'expérimentation
- suivi des critères d'investissement

2.2.7. Ordonnancement et lancement

La préparation est faite, l'ordonnancement intervient pour fixer les délais et réunir tous les moyens matériels (outillage, manutention, matières, sécurité ...) en temps utile et voulu ainsi que tous les renseignements et conditions réelles, favorables à l'exécution du travail. Concernant les moyens humains et pour compléter le potentiel à mettre en oeuvre, une liaison étroite doit être établie avec les équipes d'exécution pour tenir compte des conditions effectives de l'environnement, tout en respectant les formalités hiérarchiques.

Le lancement des travaux se traduit par la distribution du travail aux équipes d'exécution en tenant compte des contraintes de l'exploitation et des possibilités de la maintenance. Ceci permettra de suivre correctement l'avancement des travaux et de corriger les prévisions à court terme. Cela permet aussi de tenir compte de la variété des cas pour améliorer la préparation du travail.

Avant d'ordonner et de lancer les travaux, les conditions suivantes doivent être requises:

rassembler toutes les données nécessaires à l'exécution du travail déjà préparé
tenir compte de la charge et des conditions concrètes des différents moyens (humains, transport, manutention, disponibilité des matières et matériels ...)

- veiller à l'urgence et aux priorités
- veiller aux dates de lancement du travail au moment voulu
- partager le travail et définir les tâches aux équipes d'exécution en tenant compte des contraintes d'exploitation et des possibilités d'exécution.

Cette sous-structure doit établir une programmation des opérations qui consiste à gérer les délais de réalisation. Ils sont comparés aux moyens humains et matériels afin d'équilibrer constamment les charges et les possibilités.

Pour une opération qui consiste en plusieurs phases de travail, la gestion optimale des délais ne peut s'obtenir que par l'utilisation de la méthode du chemin critique ou méthode PERT (Program Evaluation and Review Technique).

Cette dernière permet, en présence de plusieurs tâche à effectuer, d'avoir un ordre de détachement des tâches avec les dates de début d'achèvement (au plus tôt et au plus tard) des travaux. Ce qui réduit considérablement le délai total d'intervention.

Suite à l'établissement du diagramme PERT pour une opération donnée, nous pourrons tracer le diagramme de GANT. Ce dernier représente la durée des tâches en tenant compte de leurs charges (nombre d'ouvriers, de matériels, coûts ...).

Ce qui permettra d'avoir une idée très précise de la charge initiale de l'opération. Si celle-ci n'est pas conforme ou harmonieuse, nous procéderons au lissage de la charge initiale qui va influencer sur le déclenchement des tâches. Mais, nous aurons agité, après lissage, sur les charges trop élevées.

Ce qui permet d'avoir une base sérieuse de décisions et des coûts maîtrisables.

Exemple

Une opération d'entretien décomposée comprend huit tâches :

Tâches	Durée (heures)	Charges (ouvriers)
1 - 2	2	5
1 - 3	4	4
1 - 5	1	5
2 - 6	4	3
3 - 4	2	4
4 - 7	3	4
5 - 6	3	3
6 - 7	1	5

Le travail commence à 08 heures du matin et il est prévu une pause de 12H00 à 13H00 pour le déjeuner .

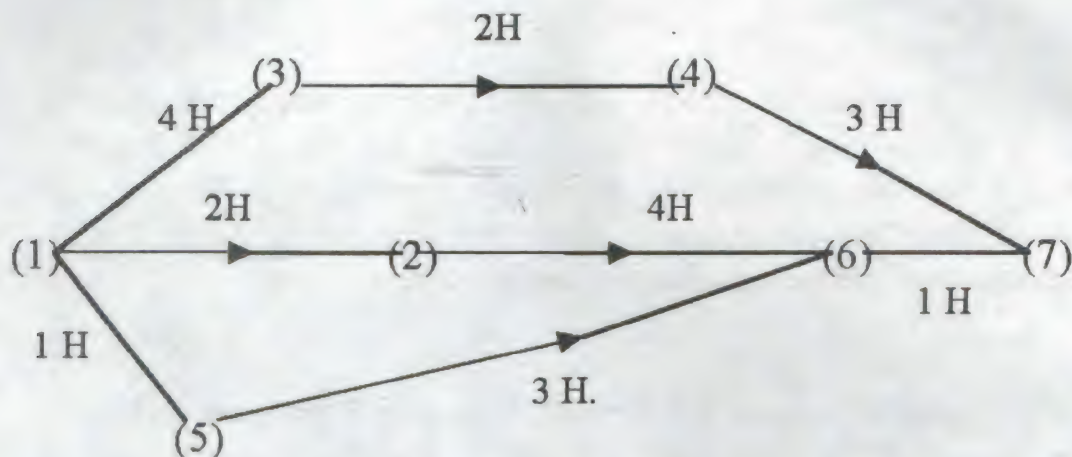
Déterminer :

- la durée minimum de l'opération;
l'effectif nécessaire pour effectuer cette opération dans les délais fixés.

1) Etablissement des heures de début et de fin (au plus tôt et au plus tard) correspondantes à chaque tâche.

Tâches	Durée	Heures de début		Heures de fin	
		Plus tôt	Plus tard	Plus tôt	Plus tard
1 - 2	2	8	10	10	12
1 - 3	4	8	8	12	12
1 - 5	1	8	13	9	14
2 - 6	4	10	13	15	17
3 - 4	2	13	13	15	15
4 - 7	3	15	15	18	18
5 - 6	3	9	14	12	17
6 - 7	1	15	17	16	18

2) Schématisons le diagramme PERT.



Il apparaît que la durée totale de l'opération est la somme des durée des opérations 1-3, 3 - 4, et 4-7. Ce qui représente une somme de 09 Heures.

3) Représentation du diagramme de GANT.

TACHES	DUREE (heures)	CHARGE (ouvriers)	8h 9h	9h 10h	10h 11h	11h 12h	12h 13h	13h 14h	14h 15h	15h 16h	16h 17h	17h 18h
1 - 2	2	5	1	2								
Lissage 1-2												
1 - 3	4	4	1			3						
1 - 5	1	5	1	5								
2 - 6	4	3			2				6			
Lissage 2-6												
3 - 4	2	4					3	4				
4 - 7	3	4							4		7	
5 - 6	3	3		5		6				6		
Lissage 5-6												
6 - 7	1	5								6	7	
Lissage 4-7												
CHARGE INITIALE			14	12	10	10		7	7	9	4	4
	6 - 7									-5		+5
	5 - 6			-3	-3	-3		+3	+3	+3		
	2 - 6				-3	-3			+3	+3		
	1 - 2		-5	-5	+5	+5						
APRES LISSAGE	CHARGE		9	4	9	9		7	10	10	10	9

Le lissage montre que l'opération pourra être effectuée en 09 Heures de temps avec un effectif de 10 Ouvriers (la charge initiale à atteint 14 ouvriers).

4) calculons la charge globale qui est la somme des produits de la durée par la charge pour chaque tâche : ce qui représente 174 heures / Ouvriers. Il n'est donc pas possible de réaliser l'opération en 7 heures de temps avec 10 ouvriers parce que la charge ne sera que de $10 \times 7 = 70$ heures / ouvriers inférieure à la charge globale.

5) Examinons le cas pour 8 heures. Cela revient à diminuer une heure sur le temps total. Il faudrait donc réétudier la possibilité de diminuer la durée de l'une des opérations 1-3, 2-4 ou 3-4. Il s'est avéré que la tâche 1-3 peut être réalisée en 3 heures mais avec une charge de 5 ouvriers.

Représentons de nouveau le diagramme de GANT.

TACHES	DUREE (heures)	CHARGE (ouvriers)	8h 9h	9h 10h	10h 11h	11h 12h	12h 13h	13h 14h	14h 15h	15h 16h	16h 17h	17h 18h
1 - 2	2	5	1	2								
Lissage 1-2												
1 - 3	4	4	1			3						
1 - 5	1	5	1	5								
2 - 6	4	3			2				6			
Lissage 2-6												
3 - 4	2	4				3		4				
4 - 7	3	4						4			7	
5 - 6	3	3		5		6						
Lissage 5-6												
6 - 7	1	5							6	7		
Lissage 4-7												
CHARGE INITIALE			15	13	11	10		7	7	9	4	
APRES LISSAGE CHARGE			10	10	10	10		10	10	7	9	

On voit bien que l'opération peut être réalisée en 8 heures avec 10 ouvriers et une charge globale de 76 heures / ouvriers .

2.2.8. Ordre de travail

C'est l'ordonnancement qui doit établir l'ordre de travail et lancer les travaux.

L'ordre de travail est conçu pour élaborer , traiter et disposer de toutes les informations relatives à une intervention en temps voulu conjointement à la préparation.

Il sert à saisir les éléments de contrôle de la nature des activités de maintenance, notamment les délais et les coûts des prestations fournies. Il devient un indicateur de comparaison des écarts existant entre les prévisions et les réalisations. Il permet aux responsables de la maintenance de prendre les décisions nécessaires ainsi que les mesures correctives qui s'imposent afin de satisfaire aux mieux les besoins de l'exploitation.

L'ordre de travail peut être permanent ou temporaire. Il est permanent dans le cas de travaux simples et connus, de courte durée et répétitifs, ceci pour simplifier les tâches administratives de la maintenance. Il est individuel et temporaire lorsqu'il s'emploie pour autoriser, lancer, contrôler et suivre des travaux importants ayant des répercussions directes sur la sécurité , les délais de réalisation et les coûts.

L'utilisation de l'ordre de travail qui est en définitive, l'autorisation et le guide des travaux, se concrétise en trois phases:

1. Avant d'engager les travaux

les informations sont utilisées à des fins d'estimation des coûts, d'approbation et de planification des délais d'intervention qui , eux même, dépendent des dates de disponibilité des équipements et des moyens humains et matériels à mettre en oeuvre.

2. Pendant l'exécution des travaux

l'ordre de travail servira à suivre et contrôler la nature, les conditions et l'état d'avancement des travaux conformément aux directives.

3. Après l'exécution des travaux

L'ordre de travail va refléter l'aspect réalisation et donner une idée concrète du déroulement des opérations. De ce fait, il doit comporter tous les renseignements utiles pour le contrôle des travaux et des coûts. Il servira à :

- mettre à jour l'historique des équipements;
- adapter les programmes de maintenance
- calculer les coûts
- contrôler les dépenses budgétaires
- améliorer la qualité des prestations,
- prendre toutes les décisions pour pouvoir optimiser la fonction entretien.

Pour formaliser le dossier relatif à une action, l'ordonnancement doit faire valider la fiche de préparation de travail en remplissant les renseignements utiles à l'ordre de travail. La fiche de préparation et l'ordre de travail peut être aussi séparés. Cependant, l'ordre de travail doit renseigner sur :

- le numéro d'ordre de travail
- les informations et directives spécifiques pour chaque service destinataire ou prestataire avec la date d'envoi;
- l'imputation analytique
- les dates de début et de fin des travaux prévus.

2.2.9. Réalisation

Lors de l'exécution des travaux, le service préparations et méthodes doit assister les équipes d'intervention. C'est la sous-structure lancement qui, présente sur le site, doit remplir toutes les tâches ci-après :

- veiller à l'application stricte des consignes et procédures de travail fournies par la préparation
- étudier les gestes et les temps d'exécution et les comparer aux normes et standards

- tenir compte et prendre conscience des problèmes rencontrés lors des opérations
- assister les équipes d'exécution et s'apprêter à résoudre à tout moment les problèmes qu'elles peuvent rencontrer
- contrôler l'efficacité de la maintenance
- contrôler la qualité de la prévision et la rapidité d'action ainsi que le taux d'utilisation des moyens
- faire appliquer les mesures de sécurité d'une façon rigoureuse et réglementaire
- assister aux essais de performance des équipements lors de la réception des équipements par l'exploitation et veiller à la conformité des paramètres et spécifications techniques de fonctionnement.

Après l'achèvement des travaux, le lancement est chargé de fournir un rapport de toutes les spécifications et remarques concernant les difficultés dans l'exécution et le déroulement des opérations avec toutes les suggestions correctives à la préparation. Ce rapport sera le complément de l'ordre de travail; on l'appelle rapport d'intervention.

2.2.10. Fichier Historique

Toutes les données mentionnées sur le rapport d'intervention seront reprises sur le dossier machine et serviront à compléter et mettre à jour la fiche historique. Cette façon de faire permet d'exploiter ces informations au fur et à mesure afin :

- d'avoir une idée plus concrète du comportement de l'équipement et de son état (taux d'usure et de défaillance, nature des pannes, ses points faibles...)
- de contrôler la consommation de la matière (consommables tels ingrédients et pièces de rechange pour améliorer la tenue des stocks
- de contrôler l'efficience de la maintenance et la précision du travail de préparation (recherche d'une meilleure efficacité de la fonction par les ratios d'efficacité: taux d'utilisation des moyens, qualité de la prévision, rapidité d'exécution ...)
- de contrôler les coûts des opérations

2.2.11. Statistiques / Ratios

Le service maintenance doit dresser des tableaux de bord et des bilans mensuels et annuels pour évaluer la fonction entretien et pour pouvoir prendre d'éventuelles décisions quant à la politique d'entretien même, lui apporter des corrections ou lui imposer une autre orientation. Ainsi ces bases stratégiques doivent refléter les exigences, la nature et l'efficacité de la maintenance.

Cette gestion permet de fixer les budgets nécessaires et définir les indicateurs budgétaires grâce à la comptabilité analytique. Cette dernière vise à :

- enregistrer les charges par centre de coût
- une meilleure approche dans la constitution des coûts
- faciliter la gestion budgétaire prévisionnelle

Outre l'exploitation des rapports d'intervention et des fichiers historiques, les statistiques doivent instaurer un système de circuits d'informations à l'aide de supports statistiques et analytiques dans le souci d'avoir en permanence les données utiles sur :

les installations et leur état (heures de marche, taux d'utilisation, taux de disponibilité, taux de fiabilité, tonnage ...)

l'utilisation des moyens et supports matériels (ateliers, manutention, engins, matière, pièces de rechange)

- les hommes de maintenance (gestion des moyens humains)
- l'interaction entre les équipements et les moyens.

L'exploitation de ces données reflétera l'aspect concret des éléments de maintenance. Les statistiques vont définir les éléments de maintenance. Les statistiques vont s'occuper de chiffrer tous les actes d'entretien concernant les équipements et les moyens.

Les principaux équipements qui coïncident avec la classe A (ou parfois A et B) de l'analyse ABC sont soigneusement suivis. De ce fait, il faut enregistrer périodiquement le nombre d'heures de leur fonctionnement et

calculer constamment (chaque mois par exemple) le taux de leur utilisation, de leur indisponibilité, de leur fiabilité et autres.

Le matériel support (machine d'atelier, engins ...) doit toujours être présent, d'où le soin particulier à lui réserver. Il faut donc envisager son suivi par les critères de fonctionnement et noter au profit de quelle entité il a servi. Ceci permet d'avoir les taux d'utilisation, les taux potentiels et ceux d'indisponibilité.

Les hommes sont les premiers à être suivis. En maintenance, les tâches ne sont pas répétitives et les standards sont difficilement déterminables. Ainsi, le contrôle et l'évaluation des activités exigent la comparaison avec un ensemble de travaux. De ce fait, le suivi est quotidien et peut être concrétisé par une fiche analytique journalière pour pouvoir déterminer les différents ratios indicateurs de productivité.

On trouvera ci-après l'énumération de quelques ratios d'efficacité utilisés en maintenance.

$$\text{Taux d'utilisation des moyens} = \frac{\text{Potentiel réalisé}}{\text{Potentiel disponible}}$$

$$\text{Taux d'utilisation ou disponibilité intrinsèque} = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}}$$

MTBF : Moyenne des temps de bon fonctionnement entre 2 défaillances

MTTR : Moyenne des temps de remise en état (de réparation)

$$\text{Taux de fonctionnement de l'équipement} = \frac{\text{Cumul heures de marche}}{\text{Heures prévues}}$$

$$\text{Taux de défaillance} = \frac{1}{\text{MTBF}}$$

$$\text{Taux de réparation} = \frac{1}{\text{MTTR}}$$

$$\text{Taux d'anticipation} = \frac{\text{Nombre interventions programmées réalisées}}{\text{Nombre total interventions programmées}}$$

$$\text{Taux de perturbation} = \frac{\text{Nombre d'interventions programmées non réalisées}}{\text{Nombre total interventions programmées}}$$

$$\text{Taux de rendement ou indice d'amélioration} = \frac{\text{Temps réalisé}}{\text{Temps programmé}}$$

$$\text{Taux d'amélioration des coûts} = \frac{\text{Coût réalisé}}{\text{Coût prévu}}$$

$$\text{Taux de consommation des pièces de rechange} = \frac{\text{Valeur des pièces consommées}}{\text{Valeur totale des stocks}}$$

$$\text{Taux budgétaire} = \frac{\text{Coût maintenance}}{\text{Chiffre d'affaire entreprise (unité)}}$$

$$\text{Taux des effectifs} = \frac{\text{Effectif maintenance}}{\text{Effectif total entreprise (unité)}}$$

$$\text{Taux de productivité} = \frac{\text{Activités}}{\text{Moyens}}$$

$$\text{Taux de rentabilité} = \frac{\text{Résultats}}{\text{Moyens}} \quad \text{ou} \quad \frac{\text{Résultats}}{\text{Activités}}$$

Ratios de contrôle de l'activité maintenance :

T1 : Total des temps standards alloués,

T2 : Total des temps passés sur les travaux couverts par des temps standards,

T3 : Total des temps passés sur les travaux productifs pour lesquels il n'existe pas de temps standards,

T4 : T2 + T3 : Total des temps passés sur les travaux productifs.

$$\text{Taux activité maintenance} = \frac{T3}{T2}$$

$$\text{Taux des travaux couverts par des temps standards} = \frac{T2}{T4}$$

2.3. Moyens humains

En maintenance, les tâches sont très précises, d'où la nécessité d'avoir une main d'oeuvre quantifiable qui soit de qualité parce que les standards sont difficilement déterminés . Pour avoir les moyens humains adéquats, il suffit :

- d'avoir une politique de besoins humains
- de déterminer les structures (organigramme, hiérarchie, notion de spécialiste)
- de déterminer le niveau des effectifs
- d'assurer la formation nécessaire

2.3.1. Politique des besoins

Adopter une politique en matière de besoins humains revient en premier lieu à opter d'abord pour une politique de maintenance donnée et fixer ensuite les conditions d'offre qui tendent à satisfaire les besoins de personnel. Selon l'importance des équipements et de l'entreprise, la taille de l'entretien est très variable.

Après avoir choisi les modes d'entretien appropriés pour maîtriser la fonction, le besoin humain doit être proportionnel au volume des travaux. A noter que la nature des interventions diffère d'une spécialité à une autre (pénibilité, temps, insalubrité).

La notion de polyvalence dans la spécialisation prend une nouvelle dimension en maintenance. Parfois, il est très difficile de diviser le travail d'interface entre deux spécialités et même pour diminuer le nombre d'intervenants, il est préférable d'avoir recours à la polyvalence. Cela permettra aussi de combler les temps morts vu que les travaux de maintenance ne sont pas homogènes dans le temps. Parfois, par exemple, les métiers de mécanicien et d'électromécanicien ou d'électricien et d'instrumentiste se rejoignent, si non se confondent.

Il s'en déduit que la politique de maintenance ainsi que la manière de l'organiser (besoin d'équipes, polyvalence) vont influencer directement sur les besoins humains qui représenteront une masse salariale importante.

2.3.2. Structures

Tout en tenant compte des conditions décrites ci-dessus, l'organigramme de la maintenance est impératif pour appliquer l'organisation scientifique du travail. Ainsi donc se trace la notion de responsabilité et de hiérarchie. Nous allons avoir principalement des exécutants et des responsables ou des équipes d'intervention et du personnel technico administratif. Pour simplifier, il suffit de décrire pour chaque poste de travail :

- l'intitulé du poste lui-même

- les conditions requises pour pouvoir occuper ce poste (diplôme, expérience exigée, aptitudes ...)
- les relations hiérarchiques
- le listing des tâches précises à exécuter ou faire exécuter.

Toutes les structures de maintenance doivent être liées, c'est pourquoi il faudrait déterminer toutes les relations fonctionnelles entre elles et vis-à-vis des autres structures de l'entreprise.

2.3.3. Niveau des effectifs

Le principe fondamental est un choix optimum, il suffit d'exécuter une tâche donnée soit par un nombre réduit de personnel et avoir un temps relativement long ou augmenter le nombre du personnel et réduire le temps.

Indépendamment des postes de travail exigés, le choix est très simple à faire sur la base des conditions suivantes :

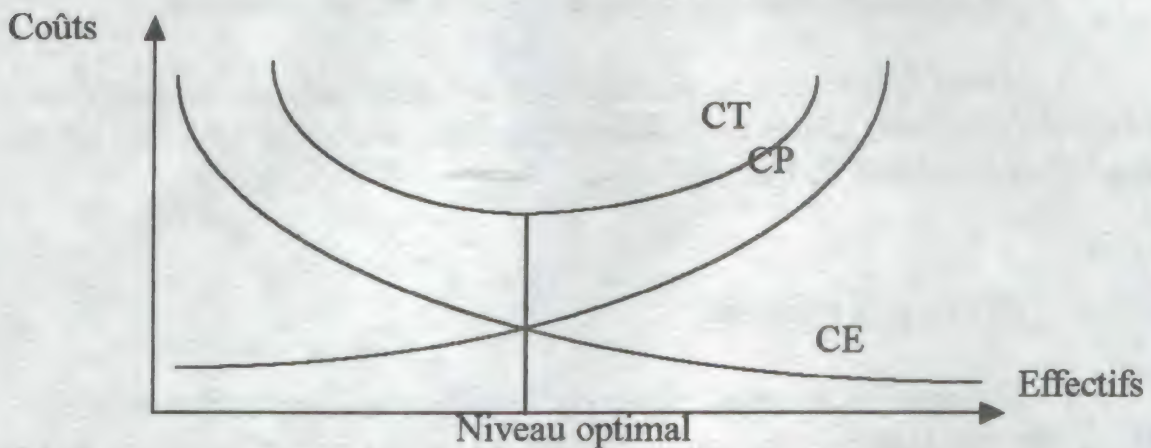
- nécessité de remettre en état de fonctionnement l'équipement (manque à gagner)
- le coût alloué.

Il existe cependant des normes pour chaque type d'industrie donné. Elles déterminent le pourcentage de l'effectif de maintenance par rapport au nombre total des employés.

Quelques exemples peuvent être cités à titre indicatif :

• raffinage et pétrole	:	33,7 %
• Produits chimiques	:	12,5 %
• Métallurgie	:	11,1 %
• Caoutchouc	:	7,7 %
• Textiles	:	5,0 %
• Equipements électrique	:	3,7 %
• Industrie mécanique	:	3,6 %
• Outillage de précision	:	2,7 %

Pour rationaliser la taille de l'effectif de maintenance, il faudrait avoir calculé les coûts d'entretien et ceux du personnel comme le montre la courbe ci-dessous:



CT : Coût total de maintenance

CE : Coût d'entretien

CP : Coûts du personnel ($CT = CE + CP$)

D'après cette courbe, il est clair que pour rechercher à tout moment d'optimiser le niveau des effectifs de maintenance, il faut avoir une approche très minutieuse des coûts.

2.3.4. Formation

Notre industrie souffre du fait d'un manque de formation cohérente avec le milieu du travail lui-même.

La formation à dispenser par le fournisseur doit faire l'objet d'une attention particulière. On insistera pour que la formation soit donnée aussi bien au personnel d'exploitation qu'à celui de la maintenance.

Le personnel de maintenance bénéficiera d'une formation poussée, axée complètement sur la pratique et dispensée de préférence sur le tas. A cet égard, le constructeur doit envoyer des équipes de formation pendant le montage et les essais de mise en service. Une intégration du personnel local dans les équipes de montage doit être complète.

On mettra alors l'accent au maximum sur la pratique du métier. On revalorisera la notion d'apprentissage et on aspirera à la polyvalence, qualité indispensable dans la plupart des métiers de maintenance.

Dans le même ordre d'idées, on favorisera tout d'abord la formation des agents de maîtrise puisque ce sont eux qui assureront la tâche de formateur.

La formation pourra prendre différentes formes, depuis celle obtenue sur le tas ou les cours à plein temps jusqu'à celle des instituts spécialisés. Il faudrait favoriser le plus possible la formation sur le tas, elle peut se pratiquer en doublure d'une assistance technique (arracher un savoir - faire) ou de personnel déjà formé.

Cet apprentissage peut bien alterner avec une formation dans un atelier de formation, relié ou non aux installations.

La formation ne doit pas être seulement technique mais doit avoir également un caractère de sensibilisation. On motivera le personnel afin qu'il soit propre, ordonnée, discipliné et soucieux de conserver les équipements. A cet effet, on cherchera à susciter la fierté et l'amour du métier.

Un manque de formation mais avant tout l'absence de tradition industrielle (expérience) font que la qualification technique du personnel de maintenance est généralement basse.

Un potentiel énorme existe déjà formé et non utilisé au service de la maintenance, à savoir les capacités universitaires et celles issues des instituts supérieurs algériens.

Très rares sont, en effet, les contacts entre l'industrie et l'enseignement supérieur. Ce dernier peut résoudre beaucoup de problèmes scientifiques par sa contribution grâce à son potentiel.

2.3.5. Exemples de fonctions qu'il aura à assurer un technicien de maintenance

1. La fonction "Etudes et méthodes"

toute tâche doit être optimisée en fonction des critères retenus dans le cadre de la formulation de la politique de maintenance.

a). Etudes techniques

- rechercher des améliorations
- participer à la conception des travaux neufs
- participer à l'analyse des accident du travail

b). Préparation - ordonnancement

- établir les fiches d'instruction pour le personnel et constituer la documentation pour interventions.
- établir les plannings d'interventions et d'approvisionnements
- réceptionner et classer des documents relatifs à l'intervention et remise à jour des dossier techniques.

c). Etudes économiques et financières

- gérer les approvisionnements
- analyser les coûts de maintenance
- analyser les coûts de défaillance
- analyser les coûts de fonctionnement
- rédiger le cahier des charges et participer à la rédaction des marchés de travaux
- gérer le suivi et la réception des travaux.

d). Stratégie et politiques de la maintenance

- définir et choisir des procédures de la maintenance corrective

- définir et choisir des procédures de la maintenance préventive conditionnelle
- définir et choisir des procédures de la maintenance préventive systématique
- élaborer et choisir des procédures de contrôle
- élaborer et choisir des procédures d'essai et de réception
- déterminer des domaines d'actions préventives prioritaires
- étudier des procédures de déclenchement des interventions
- assurer la sécurité dans l'organisation de l'environnement industriel

Pour remplir cette fonction, les techniciens des études et des méthodes disposent :

- de dossiers techniques résumant les caractéristiques techniques des machines, des pièces d'usure
- des fiches d'historiques résumant les opérations déjà effectuées, en d'autres termes, le comportement de la machine
- de la documentation fournisseur constamment tenue à jour et résumant l'évolution des techniques
- de banques de données (éventuellement)

2. La fonction "exécution mise en œuvre"

Son aspect pluritechnique nécessite une grande expérience sur les matériels des entreprises modernes et une connaissance approfondie des différentes technologies.

Le technicien devra agir avec beaucoup de rigueur pour rendre son action efficace. Ses principales tâches sont :

- gérer l'intervention de la maintenance
- connaître le comportement du matériel
- piloter des interventions de la maintenance
- appliquer les consignes d'hygiène et de sécurité et des conditions de travail

- assurer l'installation des machines et des matériels (réception, contrôle, mise en fonctionnement et mise en main)
- informer et/ou réinformer le personnel sur les équipements (consignes d'utilisation)
- assurer la remise en main du matériel après intervention
- gérer l'ordonnancement
- établir le diagnostic de défaillance du matériel
- établir les consignes d'utilisation intégrant les consignes d'hygiène et de sécurité.
- Gérer les stocks, pièces de rechange, outillages, appareils de contrôle.

3. La fonction "documentation"

Elle consiste à créer, organiser, animer toute la documentation relative à la maintenance dont les principales tâches sont :

- établir et mettre à jour l'inventaire du matériel, des installations
- constituer, compléter les dossiers techniques
- constituer, compléter les dossiers historiques
- constituer, compléter les dossiers économiques
- constituer, compléter une documentation générale (technique, scientifique, et d'hygiène et de sécurité)
- constituer, compléter une documentation fournisseurs

2.4. Moyens Matériels

Il est insensé d'investir dans de grosses installations sans penser aux très faibles outils et matériels nécessaires à la vie de ces installations. Le concepteur, lui, est très fréquemment une société qui n'exploite pas les installations qu'elle conçoit. Généralement, il ne tient pas compte des conditions particulières d'entretien et attache une trop faible attention à la maintenabilité des équipements et à ses moyens.

Pour les besoins matériels, nécessaires à un service maintenance, nous évoquerons successivement trois points essentiels: l'outillage, les équipements supports, la pièce de rechange.

2.4.1. Outillage

Pour chaque corps de métier de maintenance, l'adoption de la gamme d'outils indispensables à son activité est une tâche très simple. Nous rencontrons deux types d'outillage :

l'outillage ordinaire consommable qui fera l'objet d'un budget de consommation annuelle

l'outillage spécifique et de précision; il est généralement assez cher et est donc amortissable

2.4.2. Equipements supports

Ce sont des investissements indispensables pour le maintien des installations de production qui nécessitent eux-mêmes une gestion propre. Il se traduisent par l'ensemble des moyens supports tels que les équipements d'atelier (machines, outils, banc d'essai ...) moyens de manutention, de transport, engins, etc ...

Il arrive que ces moyens n'existent pas ou existent seulement partiellement. Dans ce cas, il peuvent faire l'objet d'une programmation dans le budget de demande de prestations extérieurs à l'entreprise.

2.4.5. Pièces de rechange

La gestion des pièces de rechange est un volet indissociable de la fonction maintenance. C'est , en effet, le problème des pièces de rechange qui cause les plus grands soucis aux gestionnaires d'installations industrielles dans un environnement non industriel.

Il y a, tout d'abord, le facteur vulnérabilité des installations dû à un climat et un milieu naturel souvent difficiles, mais aussi le manque de support logistique, un matériel mal adapté ou nouveau dans plusieurs cas, mais surtout la variété des marques et types, tout cela fait que la consommation en pièces de rechange est de loin supérieure en valeur absolue à celle des installations similaires dans un environnement industriel.

La variété des marques et types d'équipements dans une seule installation ainsi que la manque de standardisation, aggravé par l'utilisation de différentes normes, ne font que gonfler les stocks de pièces de rechange d'où l'immobilisation de gros capitaux.

A cela, il faut ajouter l'approvisionnement qui pose généralement d'énormes problèmes, à savoir :

- l'identification et la codification des pièces sont rendues difficiles par des problèmes de langue, les catalogues et les plans laissant à désirer
- La non maîtrise dans l'expression des besoins ainsi que des préconisations des services utilisateurs de maintenance
- Les procédures interminables d'achat et de dédouanement engendrent des délais très longs

Très souvent ce sont les pièces banales qui causent l'arrêt d'une installation et la fourniture de telles pièces intéresse à peine les fournisseurs. Si l'on parvient à commander des pièces des réglementations très sévères qui n'ont rien à voir avec la réalité industrielle peuvent freiner l'importation. Parfois, beaucoup de pièces arrivent aux ports et sont entreposées dans de mauvaises conditions climatiques avec de pouvoir être stockées dans des magasins qui, eux-mêmes sont souvent conçus de manière inadéquate.

L'objectif à assigner à la fonction gestion des stocks est de :

- satisfaire les besoins de maintenance
- gérer la fonction et la rationaliser
- produire sur place le maximum d'organes

Nous n'allons pas détailler les principes de la gestion des stocks et ses techniques. Nous fixerons néanmoins les principaux éléments d'une politique rationnelle du mouvement des pièces de rechange vis-a-vis de la maintenance.

2.4.6. Le stockage

Les stocks constituent une interface entre les fournisseurs qui ne livrent que de fortes quantités avec un délai très long, et les services de maintenance

qui expriment des besoins portant sur des quantités plus faibles en général mais avec des délais courts (demande ponctuelles).

Pour l'expression des besoins de stockage, les responsables de maintenance doivent déterminer le niveau de stockage optimal selon que la consommation est constante ou aléatoire en se basant sur les principes suivant :

Minimisation du coût global constitué par les frais de stockage et les frais de lancement des commandes: ce principe peut s'appliquer dès que l'on a faire à une consommation constante; on déterminera alors la quantité économique à acheter pour constituer le stocks maximum.

Minimisation du coût global constitué par le coût de possession et le coût de pénurie: ce principe permettra de déterminer le stockage lorsque la consommation des pièces n'est pas constante mais aléatoire.

Ces deux modèles ne sont pas les seuls à être utilisés. On peut néanmoins les considérer comme étant les deux modèles fondamentaux de la gestion des stocks.

2.4.7. Consommation constante

Ce modèle se base sur la propriété d'une consommation linéaire avec le temps. Soient:

A : quantité consommée annuellement

I : coût d'une commande

C : coût unitaire d'une pièce

T : taux des frais de stockage exprimé en pourcentage du coût unitaire

Q_m : stock moyen

On suppose ici que l'approvisionnement est immédiat après le passage de la commande et que l'on établisse une commande dès que le stock est nul, c'est à dire :

$$Q_m = \frac{Q + 0}{2} = \frac{Q}{2}$$

où :

Q est la quantité à commander ou stock maximum

Calculons le coût total annuel K

$$K = \frac{A}{Q} \cdot I + C.A + \frac{Q}{2} \cdot C.T$$

Ainsi Q est la variable dont il faut rechercher la valeur pour minimiser la fonction K. Pour cela K est minimum si

$$\frac{dK}{dQ} = 0$$

$$\frac{dK}{dQ} = -\frac{A.I}{Q^2} + \frac{C.T}{2} = 0$$

$$Q = \sqrt{\frac{2.A.I}{C.T}}$$

La quantité optimale à acheter Q est déterminée d'après la formule dite de Wilson.

2.4.8. Consommation aléatoire

La consommation étant aléatoire, nous envisageons les probabilités de consommations de pièces durant une période donnée (annuelle) sur des bases statistiques et déterminons les différents coûts de stockage correspondants.

Le coût le plus faible va correspondre au stock optimal.

Soient :

P_1 : Probabilité de consommer 1 pièce

P_2 : Probabilité de consommer 2 pièces

P_n : Probabilité de consommer n pièces,

$$\text{avec } \sum_{i=1}^n P_i = P_1 + P_2 + \dots + P_n = 1$$

lorsque nous aurons besoin d'une pièce, son coût s'élèvera à :

C si elle est disponible au magasin

D si elle n'est pas disponible au magasin avec $D > C$

Déterminons maintenant le coût de stockage T_i pour chaque niveau de stockage correspondant à :

$i = 0, 1, 2, \dots, n$ pièces :

Pour $i = 0$, $T_0 = P_1.D + P_2.2D + \dots + P_n.nD$

Pour $i = 1$, $T_1 = 1C + P_2.D + \dots + P_n.(n-1)D$

Pour $i = 2$, $T_2 = 2C + P_3.D + \dots + P_n.(n-2)D$

Pour $i = n$, $T_n = nC + P_n.(n-n)D = nC$

Le niveau de stockage optimal va correspondre au coût T_i le plus faible.

2.4.9. Méthode de gestion A.B.C.

Lorsqu'on se trouve devant un stock composé de milliers d'articles, on ne peut consacrer autant d'attention à chacun des articles. Ils ne présentent pas tous les mêmes risques de surstockage ou de pénurie.

Les articles les plus importants présentent des risques graves de surstockage et de pénurie. Le réapprovisionnement se fait à des périodes rapprochées et l'on est presque constamment à se demander s'il faut ou non réapprovisionner. Ces articles exigent donc une attention très fréquente et particulière.

A l'inverse, les articles ayant peu de mouvement sont réapprovisionnés pour une durée de plusieurs mois. Il n'est besoin de les surveiller que de loin en loin. D'autre part, si on approvisionne trop largement, l'incidence en sera

faible sur le stock total. Ces articles demandent donc moins d'attention et peuvent être gérés d'une façon plus large.

L'application de ce principe dans la gestion des stocks est universellement connue sous le nom de gestion ou méthode ABC. Elle s'applique à l'analyse des stocks.

Pour utiliser cette méthode, on prend comme critère de classement les articles et la valeur annuelle de consommation. La totalité des articles à conserver est répartie en trois classes A, B et C où :

- A = articles les plus importants
- B = articles importants
- C = articles à faible valeur de consommation annuelle

L'avantage majeur de ce classement est d'établir la priorité selon laquelle il faut s'occuper de chaque article ou famille d'articles.

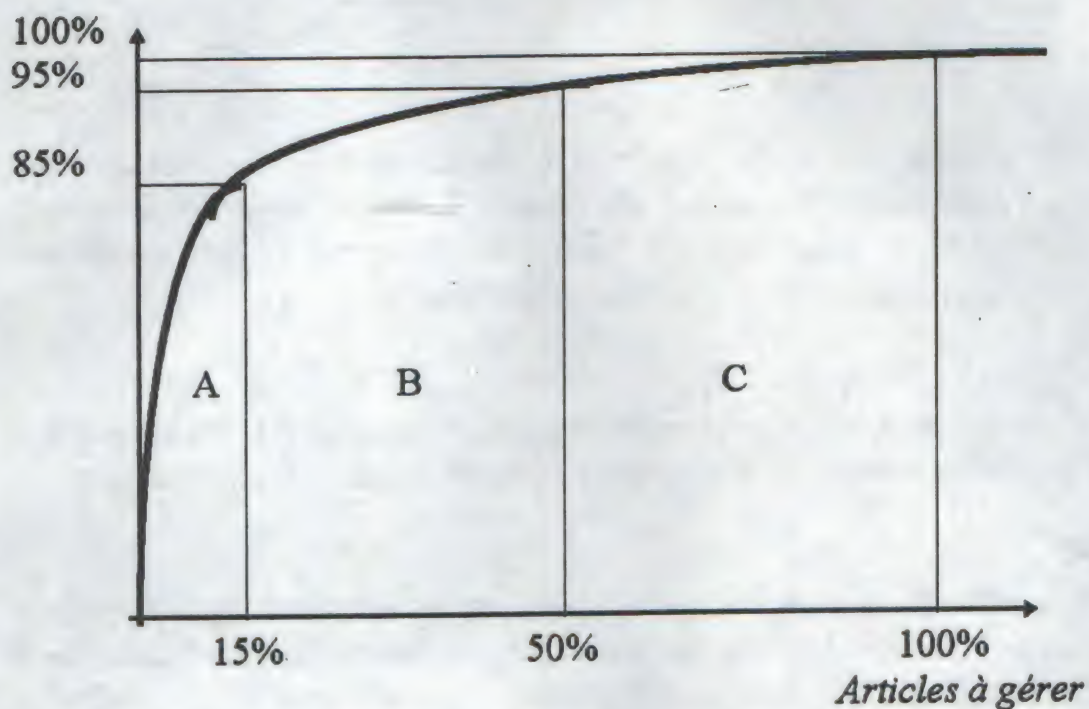
Les données strictement comptables ne sont pas toujours rigoureux; c'est pour cela qu'il faudrait analyser constamment les autres aspects technologiques, de fiabilité et d'exploitation.

Selon la gestion ABC ou loi de PARETO, la distribution générale des stocks se présente ainsi:

- classe A: 75 à 85 % de la consommation correspond à 15-25 % des articles à gérer.
- Classe B : 10 à 20 % de la consommation correspond à 25-35 % des articles à gérer.
- Classe C: 5 à 10 % de la consommation correspond à 50-60 % des articles à gérer.

De ce fait si l'on s'occupe avec rigueur de la classe A, cela veut dire qu'on pourra maîtriser 75 à 85% de la consommation, ce qui est appréciable, en gérant que 15 à 25% des articles à stocker au magasin. La courbe ci-dessous illustre la distribution des lots.

*Taux de consommation
des pièces de rechange*



Selon ce graphe, il s'avère bien que la zone A est la plus intéressante à prendre en compte car le taux de consommation des pièces est très important pour un lot d'article relativement très faible.

3. LA DISPONIBILITE ET LES CONCEPTS F.M.D.

Le concepteur d'équipement est fréquemment une société qui n'exploite pas les installations qu'elle conçoit. Elle aura de ce fait forcément des difficultés à tenir compte dans sa conception des conditions d'exploitation particulières d'exploitation des clients.

Généralement le concepteur attache peu d'attention à la maintenabilité des installations destinées à fonctionner dans des conditions particulières.

Les cahiers des charges ainsi que les contrats devraient impérativement mentionner outre les objectifs de production, les critères fondamentaux de la maintenance en partant du principe général que toute installation destinée à l'exploitation doit être forcément entretenue.

La sûreté de fonctionnement d'une machine en tenant compte de l'aspect sécurité et les critères visant à éviter un entretien fréquent, difficile et coûteux se résument en trois points connus sous la notion F.M.D. que le concepteur devrait tenir compte lors des études d'engineering notamment :

1. Fiabilité
2. Maintenabilité
3. Disponibilité

La disponibilité opérationnelle d'une machine est le double fruit de sa fiabilité élaborée par les services concepteur et installation du constructeur et de son utilisation optimale dont la charge revient au service maintenance de l'utilisateur comme l'illustre la figure 4 ci-dessous :

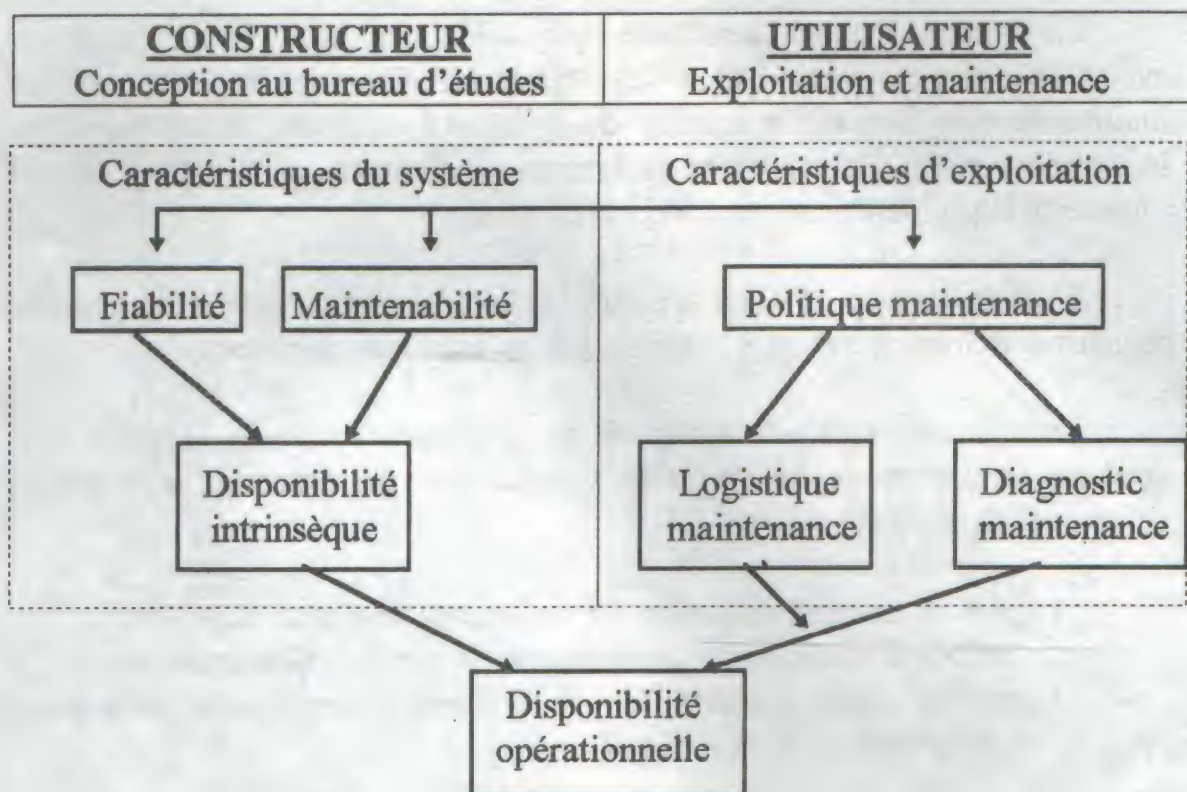


Figure 4

3.1. La fiabilité

On ne saurait absorber l'entretien des équipements et les questions qui lui sont liées sans évoquer et clarifier le concept de fiabilité.

3.1.1. Définition de la fiabilité

C'est l'aptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise ou degré de confiance que l'on accorde dans des conditions données pendant une durée donnée.

La confiance s'exprime par une probabilité de succès. Inversement, on pourrait dire qu'elle vise à connaître la probabilité d'échecs et par voie de conséquence, les précautions et les sécurités dont un matériel doit être l'objet.

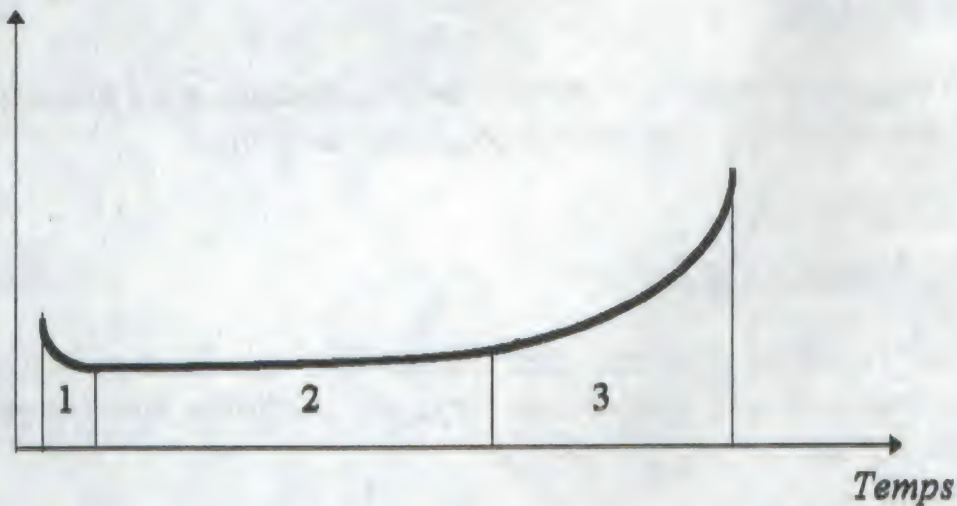
La fiabilité d'un système technique, traduisant sa durée de vie et son évolution (usure), varie selon les systèmes. Comme toute action de maintenance se base sur la fiabilité du système à entretenir, nous rappelons le comportement d'un système technique en fonction du temps. Ceci va montrer l'allure de l'usure en fonction du temps.

Toutefois, on peut admettre que les taux de détérioration de presque tous les systèmes obéissent à la même loi ou tendance exponentielle.

Tout équipement est composé de plusieurs systèmes et pour tout système, la courbe de survie ou de fiabilité doit présenter les trois étapes suivantes (figure 5) :

1. période de mortalité infantile ou période dite de rodage
2. période d'usure quasi constante ou de bon fonctionnement
3. période d'usure accentuée par tendance exponentielle ou période d'intervention de la maintenance

Taux d'avaries
ou de pannes (λ)
(usure)



1. Période de rodage

Dans cette période dite zone de défaillances de jeunesse ou mortalité infantile, le taux de pannes diminue rapidement. Seuls les défauts de mise en marche vont apparaître. Le potentiel du système ne sera optimal qu'à la

fin de cette période. Généralement, elle est relativement courte et correspond à la période de rodage ou la zone de défaillances de réglage et mise au point.

2. Période d'usure constante

Cette période de taux quasiment constant de pannes caractérise le temps de bon fonctionnement du système. Durant cette période, la charge de l'équipement est optimale et l'intervention en matière de maintenance est stable et limitée. Les seules défaillances qui peuvent surgir sont accidentelles et ne dépendent donc pas de l'âge du système.

3. Période d'usure accentuée

Le taux de pannes dans cette période dite zone de défaillances d'usures, augmente selon une fonction exponentielle dans le temps. Ceci s'explique par la limite de fatigue technologique des composants du système. Pour palier à ce cycle indésirable, l'intervention de la maintenance est primordiale afin d'évaluer son efficacité, pour essayer de prolonger autant que possible la deuxième période pour que l'exploitation ne devienne pas aléatoire.

Le problème qui s'impose est d'harmoniser les limites de fatigue de plusieurs systèmes d'un même équipement pour que la résultante de fonctionnement de cet équipement tende à se maintenir dans la deuxième période. C'est justement cette maîtrise qui va dicter les différentes méthodes d'entretien à appliquer ou pratiquer.

Pour éviter cette troisième période dans la vie d'un équipement, la maintenance intervient à chaque fois que la courbe ou le taux de défaillances tend à augmenter. Pour ce faire et pour maintenir le niveau stable correspondant à la deuxième période, nous schématisons la courbe de survie comme ci-dessous : (figure 6)

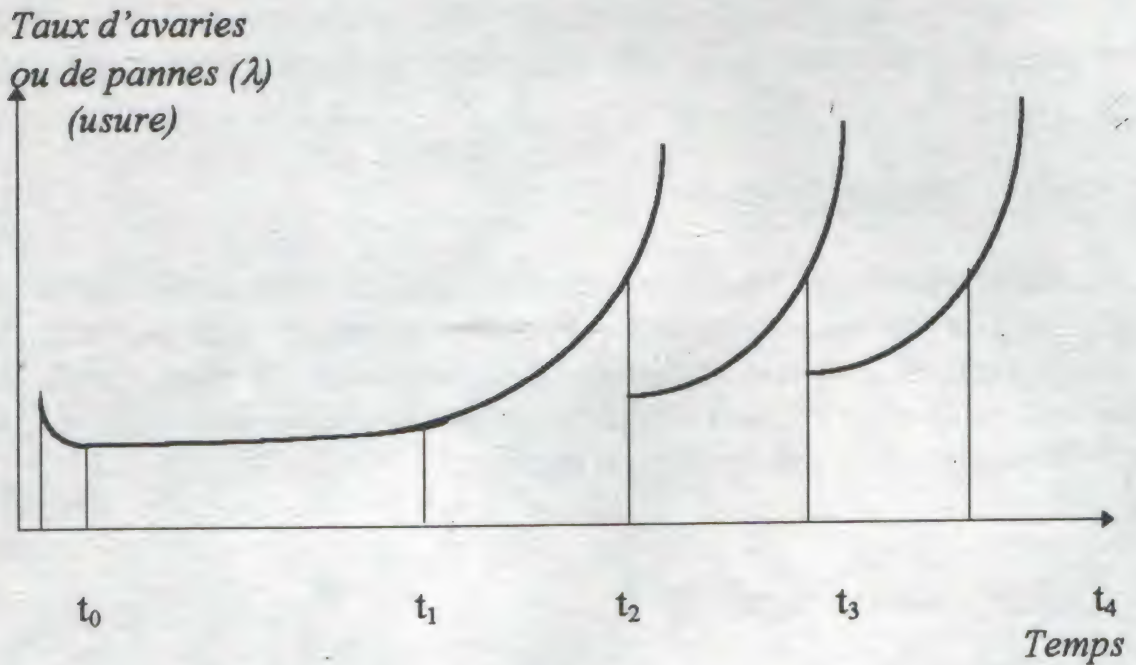


Figure 6

Nous remarquons que :

- t_1 est la fin de la période stabilisée (deuxième période) et le début de la manifestation de la période d'usure accélérée (troisième période)
- t_2, t_3, t_4 , correspondent bien à des interventions de maintenance sinon la courbe aurait déjà pris l'allure exponentielle de la troisième période indésirable.

Ainsi la fiabilité ne saurait être une caractéristique absolue et définitive d'un équipement, d'un matériel, d'une machine comme le sont ses dimensions, sa masse, ... Par sa définition même, la fiabilité est fonction du temps de fonctionnement du composant.

La fiabilité ne peut que diminuer lorsque la durée de fonctionnement s'allonge. De surcroît, la fiabilité sera fonction des conditions d'utilisation du composant, selon que celles-ci seront plus ou moins sévères.

3.1.2. Application

On dit couramment qu'un roulement a été étudié pour tenir 20.000 heures de fonctionnement. On dit aussi que tel engin exige des révisions toutes les 50 heures, 100 heures, 250 heures, etc. L'heure est ainsi l'une des unités les plus utilisées lorsqu'il s'agit d'exprimer la durée de vie d'un matériel ou la fréquence d'interventions périodiques d'entretien.

Supposons que l'on mette en service, dans les mêmes conditions de tension, 100.000 ampoules électriques identiques, c'est à dire issues du même processus de fabrication avec les mêmes normes de contrôle. Ces ampoules vont vieillir et brûler l'une après l'autre au bout de temps variables. Il est possible, à intervalles de temps réguliers (par exemple, toutes les dix heures), de compter les ampoules brûlées.

On peut dresser un tableau (figure 7) et une courbe (figures 8) donnant pour une durée d'utilisation U , le pourcentage d'ampoules encore en service, nommées ampoules survivantes, et appeler la courbe obtenue, la courbe de survie.

Ce tableau ou cette courbe fournit pour une durée d'utilisation donnée, le nombre d'ampoules d'un lot qui seront encore en service, ou, pour une seule ampoule, la probabilité pour qu'elle soit en bon état de marche. Par exemple la probabilité pour qu'une ampoule atteigne et dépasse la durée 4 est de 0,97. Celle pour qu'elle atteigne 14 n'est plus que de 0,07.

On peut poser également la question suivante : quelle probabilité une ampoule ayant déjà atteint l'âge 4 a-t-elle d'atteindre l'âge 5 ? Ou, si l'on préfère : quelle probabilité a-t-elle de périr entre l'âge 4 et l'âge 5 ?

On peut oublier (pour commencer) qu'il s'agit d'une ampoule ayant déjà atteint l'âge 4 ; on voit que la probabilité de mort de l'ampoule ou taux d'avarie absolue est pratiquement égale à la valeur absolue de la pente V' de la courbe de survie au point d'abscisse 5. Ainsi, une ampoule a d'autant plus de chance de mourir à un instant donné que la pente de la courbe de survie est plus forte à cet instant. Mais les ampoules ne sont pas toutes parvenues à l'âge 4 ; il ne reste plus à ce moment que 97% des ampoules initiales, et c'est en pratique entre ces 97% que se joue la compétition de survie. D'où la

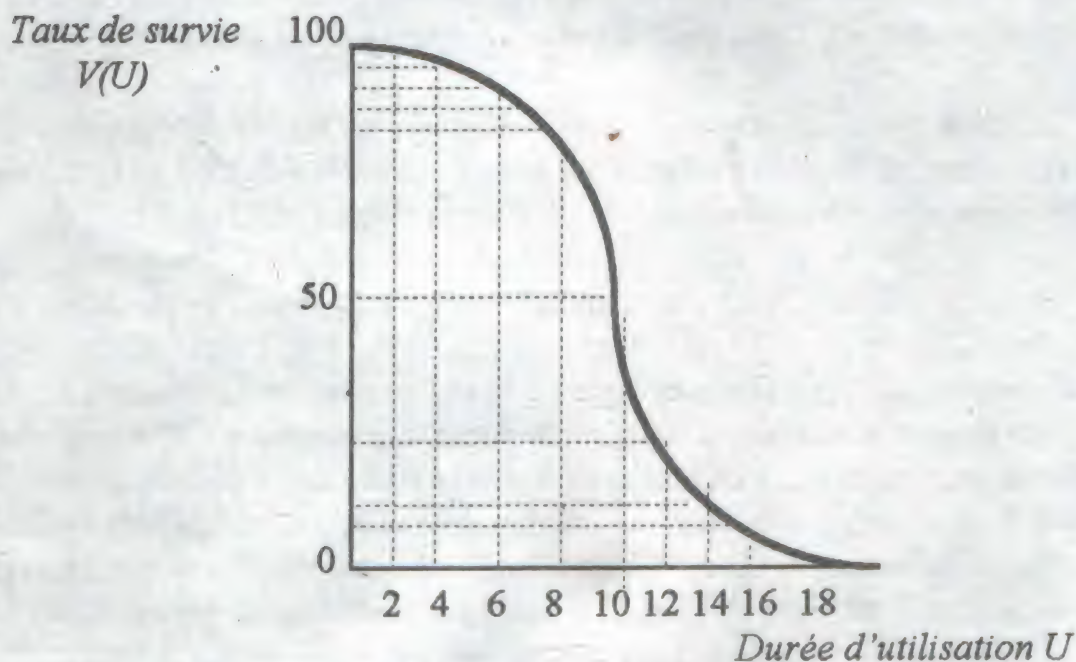
définition d'un taux d'avarie relatif qui est le vrai taux d'avarie et qui est égal non plus à $V'(U)$, mais à :

$$R(U) = - \frac{V'(U)}{V(U)}$$

TAUX DE SURVIE (Figure 7)

Intervalles de temps	Taux de mortalité	Taux de survie	Taux d'avarie relatif
0	0 %	100 %	0,00
2	1	99	0,01
4	2	97	0,02
6	4	93	0,04
8	16	77	0,17
10	29	48	0,38
12	26	22	0,59
14	15	7	0,68
16	5	2	0,71
18	2	0	1,00
20	0	0	-

COURBE DE SURVIE (Figure 8)



L'étude du taux d'avarie éclaire particulièrement les problèmes de politiques d'entretien. Pour un élément à taux d'avarie constant, une politique d'intervention préventive n'a aucun intérêt puisqu'à tout instant l'on dispose d'une chance égale de tomber en panne.

Pourtant l'inspection reste souhaitable pour tenter de détecter des signes avant-coureurs d'avaries et aussi pour remplacer les pièces dont l'usure constatée, bien qu'indépendantes de l'âge atteint par l'élément, est suffisamment importante.

Au contraire, pour un élément à taux d'avarie croissant, donc sensible au vieillissement, une politique d'intervention préventive est rentable.

Dons La fiabilité est une caractéristique d'un dispositif exprimé par la **probabilité** qu'il **accomplisse une fonction** dans des **conditions données** pendant un **temps donné**. Elle se caractérise donc par quatre concepts :

A. La probabilité

Une probabilité se définit par le rapport entre le nombre de cas favorables et le nombre de cas possibles concernant la réalisation d'un événement. Dans le cas de la fiabilité, la probabilité exprimant les chances de réussite.

B. L'accomplissement d'une fonction

Le dispositif que l'on étudie du point de vue de la fiabilité devra être dans un état tel qu'il lui permet d'accomplir la fonction requise d'une manière satisfaisante. Ceci implique un certain niveau de performances en deçà desquelles le dispositif est considéré comme défaillant.

C. Les conditions données

Les conditions sont les contraintes physiques, chimiques, électriques et mécaniques subies par le dispositif du fait de son environnement.

D. Le temps

C'est le temps exprimé au sens large. Ce sera bien souvent en fait un nombre de cycles ou caractéristique qui exprime la durée de vie.

3.1.3. Aspects probabilistes

Le mot fiabilité recouvre deux concepts majeurs celui de sécurité et celui de compétitivité. Attribuer une probabilité de bon fonctionnement à un équipement ou à un système permet de choisir les meilleures solutions technologiques, les meilleures procédures d'approvisionnement, de fabrication, d'utilisation et de maintenance.

La fiabilité s'est imposée pour répondre à une question complexe liée au coefficient ou facteur de sécurité.

Traditionnellement, on surdimensionne les pièces et l'on arrive parfois à des poids et encombrements exagérés avec des prix prohibitifs. Dans ce cas les appréciations et bornes du coefficient de sécurité deviennent superflues. Alors que la fiabilité sait apprécier le comportement du composant parce qu'il possède une loi de mortalité ou loi de dégradation et peut donc le dimensionner en conséquence.

Les technologues assurent la solidité d'une réalisation par le facteur de sécurité dit parfois facteur d'ignorance S qui est défini comme étant le rapport de la résistance à la contrainte par rapport à la contrainte appliquée :

$$S = \frac{\text{Résistance à la contrainte}}{\text{Contrainte appliquée}} = \frac{R}{C}$$

R est prise généralement comme la limite élastique

Cette technique peut générer des erreurs car en effet R est supposée une valeur moyenne (Figure 9), alors qu'en réalité du fait des hétérogénéités de la matière, de l'imprécision sur les dimensions, des états de surfaces, ... La valeur de cette résistance n'est pas déterministe du fait des différents facteurs

de variabilité et elle peut être représentée par une distribution statistique (Figure 10).

Il en est de même de la contrainte appliquée qui peut fluctuer aussi suivant la mission ou l'environnement.

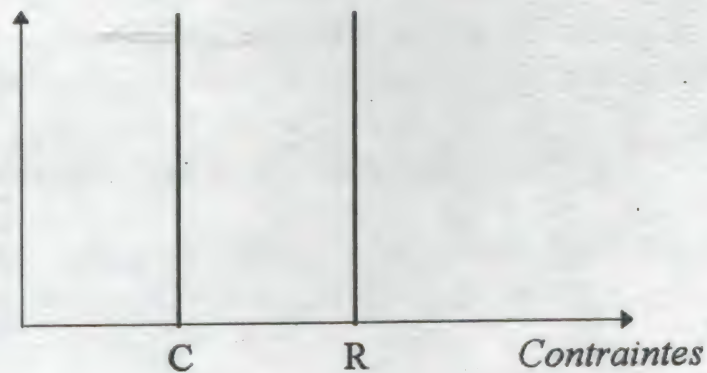


Figure 9

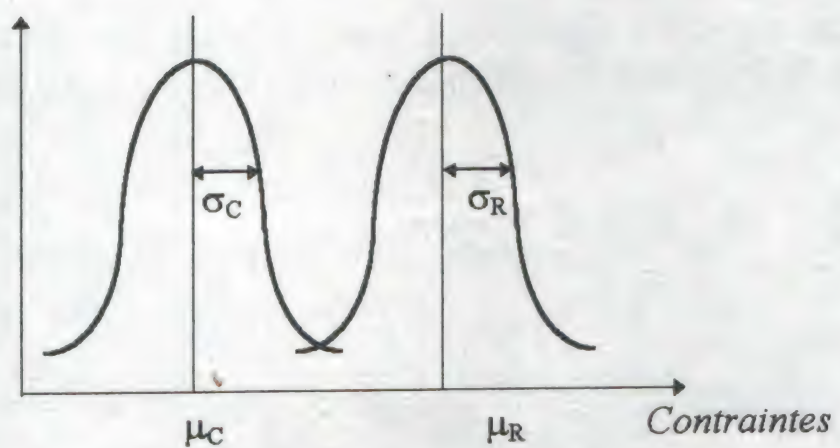


Figure 10

μ_C et μ_R représentent la moyenne de la contrainte et σ_C et σ_R leur écart type
Le coefficient extrême de sécurité devient :

$$S = \frac{R \text{ min.}}{C \text{ max.}}$$

ou sous forme :

$$S = \frac{\mu_R - K \sigma_R}{\mu_C - K \sigma_C}$$

où K est un facteur compris entre 3 et 6 suivant le type de matériel. Cependant pour une même valeur du coefficient de sécurité S correspondent toute une diversité de fiabilité que nous définirons comme suit :

La probabilité pour que R soit supérieur à C

Etant donné un coefficient de sécurité, il existe trois possibilités de le maintenir tout en faisant varier fortement la fiabilité.

A. Premier cas

Les moyennes de la distribution de la contrainte et de la résistance peuvent être figées et les écarts types variables. Ceci est illustré par les figures 11 et 12 où le coefficient de sécurité S est maintenu égal à 2.

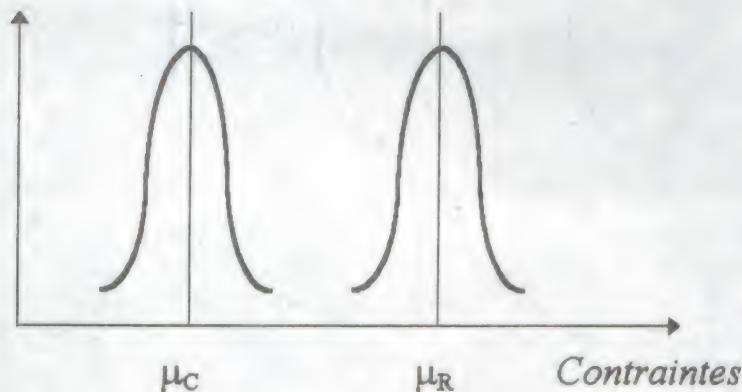


Figure 11

La figure 12 fait apparaître un recouvrement des distributions beaucoup plus sensible que sur la figure 11 car les dispersions des distributions sont plus importantes.

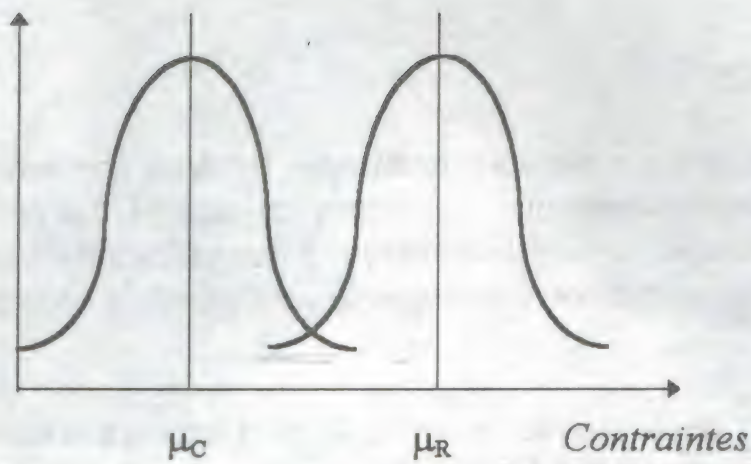


Figure 12

B. Deuxième cas

La moyenne de la contrainte et celle de la résistance sont changées dans la même proportion tout en maintenant les écarts types. Ceci fait que le coefficient de sécurité reste le même :

$$S = \frac{\mu_R}{\mu_C} = \frac{K\mu_R}{K\mu_C} = \frac{\mu'_R}{\mu'_C}$$

Avec le même coefficient de sécurité avec $K > 1$, la probabilité de défaillance est substantiellement inférieure à celle obtenue pour $K < 1$, tel que schématisé sur la figure 13.

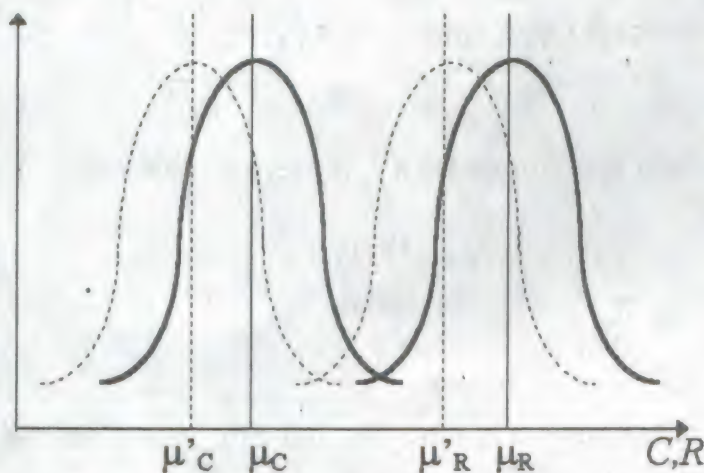


Figure 13

C. Troisième cas

Il est clair qu'il est possible de changer les deux moyennes et écarts types tout en gardant constant le coefficient de sécurité. La probabilité de défaillance et en retour la fiabilité varieront d'une valeur relativement faible sous l'effet de ces variations tandis que le coefficient de sécurité reste lui même.

C'est donc un calcul de probabilité qui permettra d'associer à un facteur de sécurité S une fiabilité, c'est à dire la probabilité pour que R soit supérieur à C.

3.1.4. Définition théorique

La fiabilité représente au bout du temps est la proportion de pièces d'un lot donné encore en fonctionnement au temps t ou la probabilité qu'un équipement fonctionne encore à t.

$$\text{Soit : } R(t) = \frac{N(t)}{N_0} \quad \text{où :}$$

$N(t)$: nombre de pièces en fonctionnement à t

N_0 : nombre de pièces en fonctionnement à t_0

La probabilité de non fonctionnement $F(t)$ sera de la forme :

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - \frac{N(t)}{N_0} = \frac{N_0 - N(t)}{N_0}$$

On définit aussi un paramètre de fiabilité que l'on appelle taux de défaillance.

Si l'on dérive $F(t)$ par rapport au temps, on obtient une fonction que l'on désigne par $f(t)$:

$$f(t) = \frac{-1}{N_0} \cdot \frac{dN(t)}{dt}$$

ou vitesse instantanée d'arrivée des pannes

En divisant par $R(t)$ la fonction $f(t)$, on obtient :

$$\frac{f(t)}{R(t)} = \frac{-1}{N_0} \cdot \frac{N_0}{N(t)} \cdot \frac{dN(t)}{dt}$$

$$\frac{f(t)}{R(t)} = \frac{-1}{N(t)} \cdot \frac{dN(t)}{dt} = \lambda(t) *$$

* Par définition, $\lambda(t)$ est la probabilité conditionnelle de défaillance dans l'intervalle de temps $(t, t + dt)$.

La fonction $\lambda(t)$ est la proportion de pièces défaillantes par unité de temps.

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{-dR(t)}{dt}$$

$$\lambda(t) dt = \frac{dR(t)}{R(t)}$$

En intégrant, on trouve finalement :

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau}$$

On utilise très souvent en maintenance une autre notion la MTBF ou Moyenne de Temps de Bon Fonctionnement (Mean Time Between Failures) et on l'exprime sous la forme :

$$MTBF = \int_0^t R(t) dt$$

ou temps moyen jusqu'à la première défaillance

Dans le cas où $\lambda(t)$ est constant, quoique en technologie λ constant n'a pas de sens, la MTBF prend la forme :

$$MTBF = \frac{1}{\lambda}$$

Le taux de panne désigné par λ est donc égal à l'inverse de la MTBF. C'est le nombre de pannes par heures de fonctionnement. Par exemple si $\lambda = 10^{-4}$ signifie qu'il y a une panne toutes les 10^4 heures.

On inclut une autre notion de MTTR ou temps moyen pour réparer (Mean Time To Repair).

3.2. La maintenabilité

Elle peut se traduire comme étant une caractéristique permettant d'assurer la disposition et la facilité à la maintenance dans les meilleures conditions possibles.

Dans des conditions données d'utilisation pour lesquelles il a été conçu, la maintenabilité est l'aptitude d'un bien à être maintenu ou rétabli dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données avec des procédures et des moyens prescrits.

C'est aussi la faculté de réparabilité ou simplification des tâches visant à entretenir et réparer le matériel (accessibilité, encombrement, montage, démontage, sécurité, ...).

Il existe aussi une définition probabiliste plus stricte de la maintenabilité : c'est la probabilité de remettre un système en état de fonctionner en un temps donné avec des moyens donnés et dans des conditions données en retrouvant la fiabilité initiale.

L'indicateur privilégié de maintenabilité correspond aux temps d'immobilisation qui se décomposent en :

- délais d'intervention
- durée d'intervention

Une approche d'étude de maintenabilité doit être développée au stade de la conception des équipements pour répondre aux aspects liés à :

- l'évidence des éléments qui permettent d'accroître la maintenabilité tels que les critères liés au bien et aux moyens de la maintenance
- diminution de la durée de détection des défaillances (dispositifs de vérification)
- diminution de la durée du diagnostic (repérage, documentation, procédures)
- diminution de la durée de réparation (accessibilité, facilité de démontage et remontage, interchangeabilité)
- diminution de la durée nécessaire au contrôle (essais en exploitation, limites de tolérances)

3.3. La disponibilité

C'est l'aptitude d'un bien sous les aspects combinés de sa fiabilité, maintenabilité et de l'organisation de la maintenance à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions de temps déterminées.

3.3.1. Objectif économique

Le but recherché dans le fonctionnement des machines qui tendent vers la complexité et les faramineux prix d'acquisition n'est autre que d'avoir réaliser la notion du plus opérationnel possible.

Ceci se traduit en maintenance par la "disponibilité opérationnelle" (Figure 14, qui est la reprise de la figure 4) d'une machine qui est le double fruit de sa "fiabilité" élaborée par les services conception et installation du constructeur et de son "utilisation optimale" dont la charge revient au service maintenance de l'utilisateur.

CONSTRUCTEUR		UTILISATEUR	
Conception au Bureau d'Etudes		Exploitation et Maintenance	
Caractéristiques du Système		Caractéristiques d'Exploitation	
FIABILITE	MAINTENABILITE	POLITIQUE MAINTENANCE	
DISPONIBILITE INTRINSEQUE		Logistique Maintenance	Diagnostic Surveillance
DISPONIBILITE OPERATIONNELLE			
<ul style="list-style-type: none"> • Coût d'exploitation • Coût de maintenance • Coût de possession 			

Disponibilité opérationnelle d'une machine
selon la Norme Française NF X60 503

Figure 14

Cependant la disponibilité absolue est tributaire de trois obstacles prépondérants :

3.3.2. Obstacles économiques

Les répercussions multiples et variées sont souvent masquées et ou mal cernées et par conséquent ne peuvent être chiffrées par les moyens de gestion comptable.

3.3.3. Obstacles humains

Une politique FMD suppose un effort de formation et d'informations pluridisciplinaires pour pouvoir :

- adopter une structuration spécifique et adaptée
- développer les méthodes d'analyse de fiabilité qualitative (AMDEC ou FMECA) et quantitative (MTBF et MTTR)

3.3.4. Obstacles techniques

Ils sont généralement proches des limites de la recherche scientifique appliquée notamment :

- manque de données chiffrées sur les taux de défaillance parce que les lois statistiques utilisées sont complexes
- mauvaise appréhension des système
- manque de surveillance intelligente

La disponibilité peut se mesurer :

- à un instant donné (disponibilité instantanée)
- sur un intervalle de temps (disponibilité moyenne)
- à la limite, si elle existe, de la disponibilité instantanée lorsque $t \rightarrow \infty$ (disponibilité asymptotique)

Disponibilité moyenne si les temps sont cumulés:

$$D_{\text{moy}} = \frac{\text{Temps de disponibilité}}{\text{Temps de disponibilité} + \text{Temps d'indisponibilité}}$$

le cas particulier est la disponibilité intrinsèque si l'on considère la moyenne des temps :

$$\text{Dint.} = \frac{\text{M.T.B.F.}}{\text{M.T.B.F.} + \text{M.T.T.R.}}$$

Si l'on ajoute la moyenne des temps logistiques (M.T.L.) à la disponibilité intrinsèque, on obtient la disponibilité opérationnelle :

$$\text{Doper.} = \frac{\text{M.T.B.F.}}{\text{M.T.B.F.} + \text{M.T.T.R.} + \text{M.T.L.}}$$

3.4. Notions de F.M.D.

Les expressions Fiabilité, Maintenabilité et Disponibilité sont bien connues dans les domaines aéronautiques, spatial, nucléaire et chimique où elles ont été imposées et développées pour des raisons de sécurité des personnes et des biens.

Bien spécifier le niveau de disponibilité, bien le contrôler, agir sur les facteurs permettant son optimisation sont des actions du ressort tout à la fois des concepteurs de la machine et des hommes de la maintenance.

Des outils et des méthodes leur assurent une démarche rationnelle et structurée comme :

- les moyens statistiques pour les modèles de calcul de la fiabilité
- les moyens techniques comme l'instrumentation et la mesure pour la collecte des données
- les outils méthodologiques comme l'Analyse de Modes de Défaillance, de leur Effets et de leur Criticité dite AMDEC ou FMECA

L'AMDEC sera faite par un groupe de travail fonctionnant sur le principe des cercles de qualité et comprenant les concepteurs, les personnes

des services après vente, des spécialistes de fiabilité et les personnes de maintenance de l'utilisateur.

Chaque sous système remplira sa mission propre et constitue une composante de la mission globale de l'ensemble. Et à partir de la fiabilité $ri(t)$ de chacun d'eux, on pourra obtenir la fiabilité de l'ensemble $Ri(t)$.

Encore il faut déterminer les différents composants et pour cela, trois étapes successives sont nécessaires :

1. l'analyse de la mission
2. l'analyse qualitative des défaillances possibles par FMEA
3. l'analyse quantitative et ses défaillances par AMDEC ou FMCEA

3.4.1. Première étape : l'analyse mission

Cela nécessite l'inventaire complet des contraintes imposées au système telles que :

- modes et durées de fonctionnement
- spécifications fonctionnelles
- performances souhaitées
- conditions de fonctionnement (thermiques, chimiques, vibratoires, ...)

Le but est d'aboutir à inventorier les causes possibles de défaillance et en distinguer deux types de matériels : les systèmes dits "non réparables" et "réparables".

3.4.2. Deuxième étape : l'analyse qualitative

Il s'agit d'effectuer l'analyse de toutes les défaillances possibles du système et de leurs conséquences sans préjuger leur probabilité d'apparition.

On dit en core faire une FMEA (Failure Modes and Effets). La marche à suivre est la suivante :

- identification des sous-ensembles
- liste de leurs fonctions
- inventaire de tous les modes de défaillance
- étude des conséquences sur le fonctionnement
- recherche des moyens de détection des effets

Une fois que cette étape est achevée, il va être possible de quantifier les probabilités de pannes $r_i(t)$.

3.4.3. Troisième étape : l'analyse quantitative

C'est l'analyse des modes de défaillances du point de vue de leur effet et de leur criticité dite AMDEC ou FMCEA. Elle a pour objet premier de déterminer la gravité de tous les modes significatifs de défaillance sur le succès du système.

Il ne faudrait effectuer cette analyse que pour les sous ensembles ayant présentés des résultats défavorables lors de la deuxième étape par analyse FMEA.

La détermination de la fiabilité dépend du système réparable ou non réparable pour aboutir à l'expression de la disponibilité.

Les cahiers des charges fonctionnels doivent contenir les clauses F.M.D. complétées par la mise en œuvre des idées pratiques issues de l'expérience des techniciens du terrain.

Inclure les coûts de maintenance dans les coûts globaux d'exploitation suppose que l'on sait évaluer :

- les taux de pannes autrement dit la fiabilité par la MTBF
- les temps pour réparer donc une maîtrise de la maintenabilité par la MTTR
- les stocks des pièces de rechange par une logistique infaillible
- les modes des défaillances par les diagnostics et les surveillances

L'illustration ci-après (Figure 15) résume les facteurs dont dépend la disponibilité d'une machine selon la norme NFX60 513.

La Disponibilité dépend des quatre facteurs suivants :

1. CONTRAINTES D'OPTIMISATION	
• Coûts d'acquisition	
• Coûts d'exploitation	
• Coûts d'indisponibilité	
• Volume	
• Poids	

2. LOGISTIQUE	
POLITIQUE	MOYENS
• Entretien Maintenance	• Documentation
• Maintenance corrective et préventive	• Personnel
• Réapprovisionnement des stocks	• Formation
	• Matériel de maintenance
	• Niveau des stocks

3. MAINTENABILITE
• Testabilité (couverture de test, localisation de la panne)
• Accessibilité
• Démontabilité

4. FIABILITE
• Architecture
• Profil de mission
• Taux de défaillance et durée de vie des constituants

Figure 15

3.5. Coûts et analyse d'une politique F.M.D.

3.5.1. Coûts

Les suppléments d'études sont traduits par l'investissement dans un système de recueil de données donc considérés comme charges supplémentaires liées au recueil et au traitement des données.

3.5.2. Avantages

- économie de mise au point de l'installation (à productivité égale) moins de modifications et meilleure identification de ces modifications
- atteinte plus rapide, mieux garantie, de l'objectif de production, avançant d'autant le début de la période d'amortissement.
- atteindre une productivité supérieure à celle qui aurait été obtenue finalement sans études de fiabilité.
- meilleure optimisation des stocks des pièces de rechange.
- meilleure planification de la maintenance et réduction des pannes.
- possession de données de base constituant de bons atouts pour la conception de l'installation suivante (nouvellement ou remplacement).

4. METHODES ET TECHNIQUES DE LA MAINTENANCE

4.1. Généralités

L'analyse des concepts comporte quatre étapes :

1. Les événements qui sont à l'origine de l'action :

- la référence à un échéancier
- la subordination à un type d'événement prédéterminé (auto-diagnostic, information d'un capteur, mesure d'une usure,...)
- l'apparition d'une défaillance

2. Les méthodes de maintenance qui leur seront respectivement associées :

- la maintenance corrective
- la maintenance préventive systématique
- la maintenance préventive conditionnelle

3. Les opérations de maintenance proprement dites :

- inspection
- contrôle
- visite
- dépannage
- réparation

4. Les activités connexes :

- maintenance d'amélioration
- rénovation
- reconstruction
- modernisation
- travaux neufs
- sécurité

Les opérations de maintenance et les activités connexes de maintenance proprement dites sont décomposées en cinq niveaux

d'interventions à partir du simple réglage (1° niveau) à l'opération lourde de maintenance confiée à un atelier central spécialisé (5° niveau).

4.2. Les méthodes de maintenance

En dépit des différentes appellations et modes d'entretien classiques préconisés par les uns et les autres, deux formes de maintenance à retenir, celle curative et préventive pour pouvoir formuler les trois seuls types de maintenance que stipule la norme AFNOR NF X 60-010 :

- A. la maintenance corrective appelée parfois curative
- B. la maintenance préventive systématique
- C. la maintenance préventive conditionnelle

Le choix entre les méthodes de maintenance s'effectue selon les objectifs de la direction conformément aux politiques de maintenance arrêtées tout en se basant sur :

- le fonctionnement et caractéristiques des équipements
- le comportement des équipements en exploitation
- les conditions d'application de chaque méthodes
- les coûts de maintenance et les coûts de perte de production

Pratiquement tous les autres modes de maintenance ne seront que des sous classes de ces trois types principaux. Avant de donner les différentes définitions, l'exemple simple d'usure et de changement des plaquettes de frein d'un véhicule illustre clairement la configuration spécifique de chaque type de maintenance.

A. La maintenance corrective

Le conducteur ne remplace pas ses patins jusqu'à la perte totale de freinage par usure complète des garnitures de frein. A ce moment aléatoire,

on est obligé de les remplacer sans pour autant savoir les conséquences sur les autres organes du système ou sur l'incident.

B. La maintenance préventive systématique

Selon l'expérience pour ne pas dire les statistiques, les patins de frein du véhicule devront être changés par exemple toutes les 20.000 kilomètres de fonctionnement avant d'arriver à l'usure complète et éviter la panne. Les garnitures de frein ne sont pas consommées en totalité et l'on tolère de rejeter un certain pourcentage qui aurait pu servir.

C. Maintenance préventive conditionnelle

Le système de freinage et spécialement les garnitures de frein sont contrôlées périodiquement ou continuellement à l'aide d'un système de mesure de l'état d'usure de l'épaisseur des garnitures en fonction du temps et des conditions de fonctionnement du véhicule, avec des seuils de tolérance ou d'alarme. A chaque instant les paramètres de mesure et ou contrôle montrent comment s'usent et se comportent les plaquettes.

Là le jugement du remplacement des patins est conditionné par l'état, en temps réel des garnitures, édicté par les paramètres donnés par le système de mesure. La consommation de l'épaisseur des garnitures est ni totale avec dégâts, ni minime avec perte d'épaisseur utilisable mais maximale tout en assurant la sécurité de ne pas avoir la panne.

Tableau récapitulatif

MAINTENANCE		
CORRECTIVE	PREVENTIVE	
	SYSTEMATIQUE	CONDITIONNELLE
Effectuée après la panne	Effectuée à intervalle régulier de façon systématique.	Effectuée en fonction de l'état du matériel

4.2.1. La maintenance corrective

Elle est appelée aussi maintenance fortuite, accidentelle ou curative. C'est l'action d'une maintenance consécutive à une panne. On attend la panne pour agir et l'entretien devient synonyme de dépannage ou de réparation. Il y a lieu d'intervenir rapidement parce que le besoin de la machine est urgent du fait qu'elle se trouve subitement arrêtée et que cet arrêt n'étant pas programmé.

Il en résulte des détériorations profondes alors qu'un arrêt préalable le plus souvent aurait limité la panne en importance d'où les coûts sont conséquents d'autant plus que les coûts augmentent rapidement et d'une façon brutale avec l'âge des appareils.

C'est une politique de maintenance (dépannage et réparation) qui correspond à une attitude de réaction à des événements aléatoires et qui s'applique après la panne, donc qu'elle n'a pas été "pensée" puisque effectuée après défaillance.

Pour en diminuer les conséquences, on est conduit à :

- procéder à l'analyse des modes de défaillance de leurs effets et de leur criticité (AMDEC), méthode que nous exposons plus tard, permettant de mettre en évidence de façon prospective un certain nombre d'organes ou de machines critiques pour la sécurité ou la fiabilité d'un système après l'inventaire des défaillances possibles.
- installer des éléments de secours par redondance de matériels
- utiliser des technologies plus fiables
- rechercher des méthodes de surveillance les mieux adaptées aux points névralgiques

La maintenance corrective devra s'appliquer automatiquement aux défaillances complètes et soudaines dites catalectiques, comme par exemple la rupture brusque d'une pièce mécanique ou le court circuit d'un système électrique. Hormis ce cas, ce type de maintenance sera réservé à du matériel peu coûteux, non stratégique pour la production et dont la panne aurait peu

d'influence sur la sécurité. La panne est un mal qu'il faudrait de moins en moins subir.

Courbe caractéristique des coûts

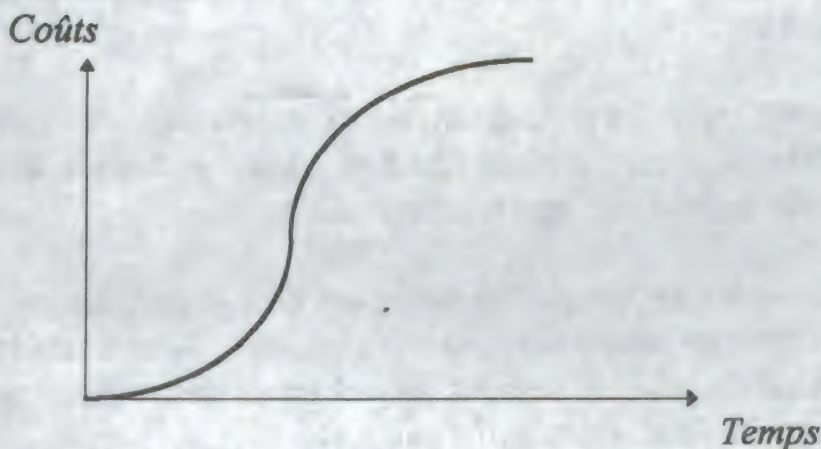


Figure 22

Les coûts augmentent de façon brutale avec l'âge des appareils (Figure 22).

4.2.2. La maintenance préventive systématique

La maintenance préventive est effectuée selon des critères prédéterminés dans l'intention de réduire la probabilité de défaillance d'un bien. On distingue deux cas de maintenance préventive, celle systématique et celle conditionnelle.

En maintenance systématique, la visite des équipements est dictée par des données statistiques à intervalles réguliers et fixes. Les éléments constitutifs des équipements étant renouvelés avant l'épuisement total de leur vie utile. L'intervention est provoquée avant l'avarie.

Ces intervalles sont souvent déterminés statistiquement comme étant la période (à partir de l'état neuf ou rénové) à la fin de laquelle le taux de pannes cumulées n'excède pas les 2,5 % par prudence ou méconnaissance parfaite et précise des effets d'usure et comportement des machines.

Là on est conduit à changer ou à réparer des pièces qui auraient très bien pu fonctionner encore pendant un certain temps.

Dans une politique prévisionnelle bien adaptée, l'on ne subit pas la panne car elle est prévue, et le budget est donc la conséquence de prévisions calculées et prévues.

Le contrôle budgétaire reste un contrôle normal. Une fois que les choix sont faits au départ, donc rentabilisés, toute économie devient une dépense ou correspond à une mauvaise prévision.

Cependant ce type de maintenance est déjà mieux adapté pour les équipements vitaux de production que celle curative. Néanmoins le seuil de sécurité exigé est un seuil en dessous duquel on ne désire pas descendre et la multiplication intolérable des indisponibilités.

Courbes caractéristiques des coûts

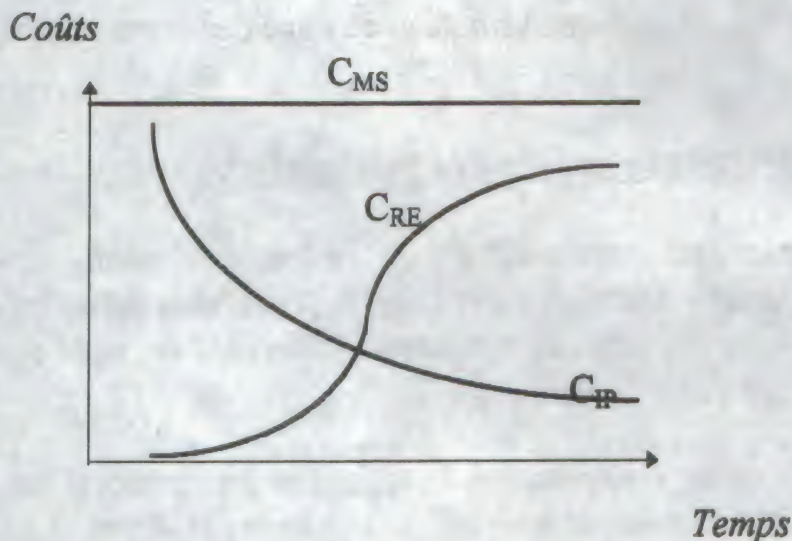


Figure 23

C_{MS} : Coût de Maintenance Systématique

C_{IP} : Coût Intrinsèque de la Prévention

C_{RE} : Coût des Réparations Evitées

$$C_{IP} = C_{MS} - C_{RE}$$

Le tribut à payer pour assurer la disponibilité de l'outil de production diminue avec le temps lorsqu'on lui soustrait le coût des réparations évitées.

4.2.2.1. Avantages

- le coût de chaque opération est prédéterminé et la gestion financière du service en est facilitée
- les opérations et les arrêts sont programmés en accord avec la production

4.2.2.2. Inconvénients

- le coût des opérations est élevé car la périodicité est calée sur la durée de vie d'un composant
- l'intervention est anticipée pour rester en phase avec d'autres arrêts
- le démontage même partiel d'un appareil incite aux changements de pièces par précaution
- la multitude des opérations de démontage accroît le risque d'introduction de nouvelles pannes dites "de jeunesse" ou "de rodage". La fiabilité des machines après remontage se trouve réduite ou fragilisée du fait d'erreurs humaines

4.2.2.3. Exemple de vidange d'huile d'un véhicule

Selon la courbe caractéristique du nombre de véhicules identiques d'un parc dont l'huile moteur atteint strictement (ni plus ni moins) un taux de dégradation nécessitant une vidange en fonction du nombre de kilomètres parcourus.

Cette courbe est basée sur l'observation de la moyenne et de l'écart type qui servent le plus souvent de référence pour déterminer la périodicité des opérations en maintenance systématique.

*Nombre de véhicules nécessitant
au sens strict une vidange*

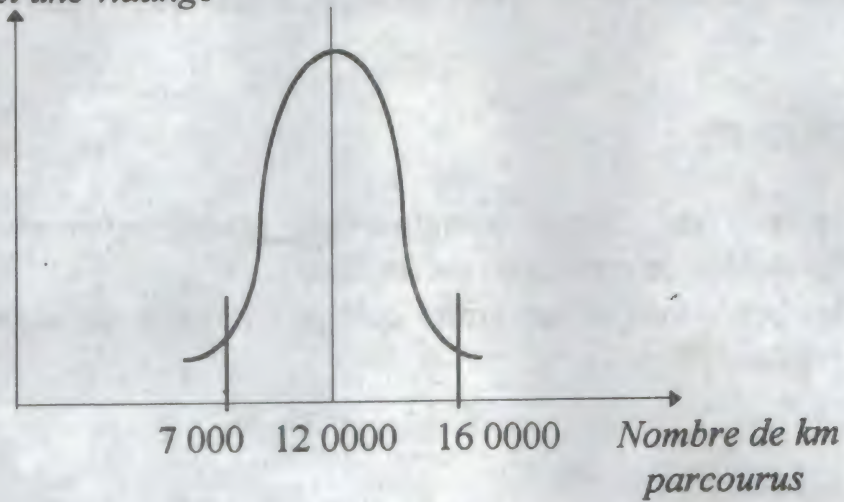


Figure 24

Supposons que le constructeur fixe la vidange à 7000 km alors qu'on constate bien que :

- seulement 2,5 % des véhicules en ont réellement besoin à 7000 km.
- la plus part des véhicules auraient pu atteindre 12 000 km.
- Quelques uns même auraient pu aller jusqu'à 16 000 km.

Et pourtant par sécurité, dans ce type de maintenance, tous les véhicules seront vidangés à 7000 km.

4.2.2.4. Exemple de remplacement systématique de roulement

De même sur la courbe de probabilité des défaillances d'un roulement en fonction de la durée de fonctionnement selon la courbe ci-après :

Probabilité de défaillance

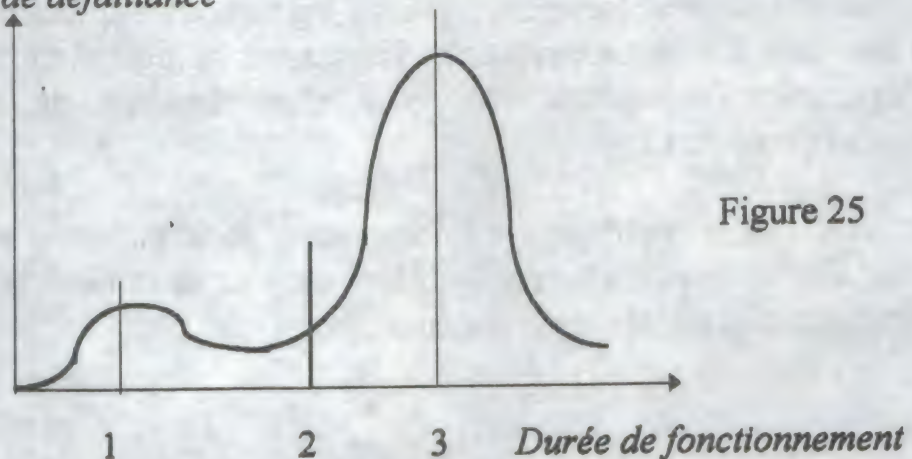


Figure 25

1. Panne de jeunesse
2. Périodicité de remplacement
3. Vie moyenne

On s'aperçoit que la périodicité de remplacement étant déterminée pour que le risque de défaillance soit très faible. De nombreux roulements ou autres pièces qui auraient pu tourner beaucoup plus longtemps sont gaspillées et l'on jette en définitive du matériel en bon état.

Il est important de conclure que l'intérêt de la maintenance systématique probant par rapport à celle corrective sur les coûts de production lui ont valu de belles années mais aujourd'hui :

- le remplacement systématique du matériel doit disparaître progressivement sauf pour du petit matériel peu coûteux (graissage, filtres, joints, petites pièces d'usure, ...).
- l'auscultation périodique, aujourd'hui encore très répandue, doit céder la place à des méthodes de maintenance conditionnelle.

4.2.3. La maintenance préventive conditionnelle

La maintenance conditionnelle dite aussi prédictive est une maintenance préventive subordonnée à un type d'événement prédéterminé par un auto-diagnostic, une information d'un capteur, d'une mesure d'une usure ou un autre outil révélateur de l'état de dégradation actuel et prématuré du bien.

L'intervention est conditionnée non pas par un échéancier mais par la mesure d'un paramètre de fonctionnement représentatif de l'usure ou de la dégradation de différents composants. Somme toute il s'agit ici de prévenir la dégradation même par une auscultation continue, périodique ou programmée. Les équipements vitaux d'une installation exigent l'utilisation au maximum la vie utile des éléments constitutifs.

La recherche d'un moyen pour parfaire un double défi :

- augmenter la productivité par une disponibilité accrue des moyens de production

- ne pas entraîner une inflation du budget de maintenance

a conduit à l'approche par la maintenance conditionnelle qui permet sans démontage ou arrêt de production de prévenir, d'en amoindrir les effets et d'en programmer la réparation en dehors des pointes de production.

Tout l'intérêt est porté à la surveillance de paramètres et ses corollaires par l'analyse de tendance et détection d'événements avec l'utilisation indispensable et exigée de l'informatique ou la gestion de la maintenance assistée par ordinateur.

Le fait de pouvoir détecter rapidement les anomalies, sans même démonter l'appareil, ainsi que pouvoir prévenir la panne et en prévoir la réparation le plus tard possible, en fonction des impératifs de production, ce qui fait de la maintenance conditionnelle une technique efficace permettant une augmentation perceptible de la productivité.

En d'autres termes, l'intervention n'aura lieu que si nécessaire en établissant au préalable un diagnostic avant de programmer la réparation.

La pratique de la maintenance conditionnelle consiste à ne changer l'élément que lorsque celui-ci présente des signes de vieillissement ou d'usure mettant en cause à brève échéance ses performances et comporte trois phases :

1. la détection du défaut qui se développe
2. l'établissement d'un diagnostic
3. l'analyse de la tendance

4.2.3.1. La détection du défaut qui se développe

A la mise en route de chaque équipement, les principales caractéristiques de base des appareils sont enregistrées notamment la signature vibratoire (si le paramètre vibratoire s'avère être un paramètre intéressant de surveillance comme par exemple pour les machines tournantes) et les divers paramètres de fonctionnement (température, usure, performances, ...).

Ces caractéristiques ou signatures, serviront de référence pour suivre, par comparaison, l'évolution d'éventuels défauts ultérieurs.

4.2.3.2. L'établissement d'un diagnostic

Dès qu'une anomalie est détectée par les outils caractéristiques, au sens d'analyse de paramètres, un diagnostic concernant l'origine et la gravité du défaut constaté sera établi.

4.2.3.3. l'analyse de la tendance

L'établissement du diagnostic permet de préjuger du temps dont on dispose avant la panne pour laisser l'appareil fonctionner mais sous surveillance renforcée et prévoir d'ores et déjà la réparation.

Evolution paramètre significatif
Taux de panne, usure

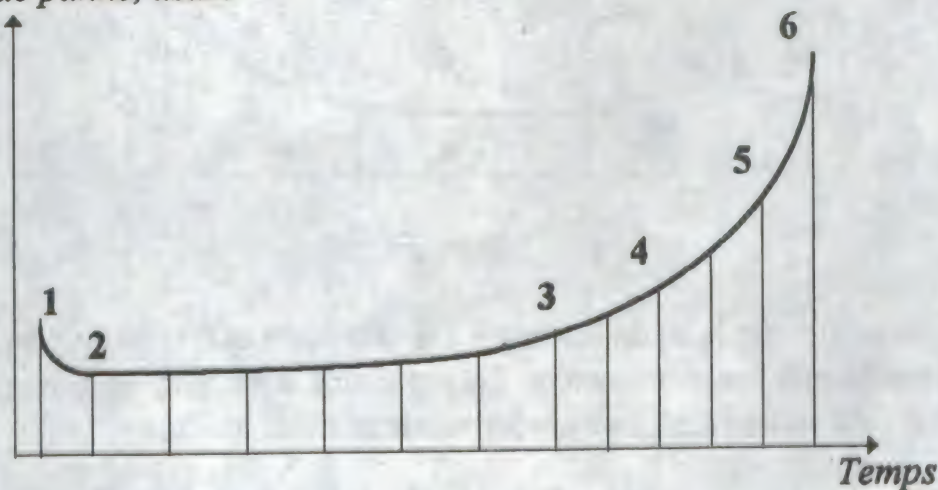


Figure 26

1. Mise en marche de l'équipement, machine neuve ou réparée
- 1 à 2 : Période de jeunesse ou rodage
- 2 à 3 : Niveau normal de bon fonctionnement, partie linéaire avec mesures périodiques normales
3. Le défaut s'annonce ou la détection du défaut donne le seuil minimum d'alarme

- 3 à 4 : La durée entre les mesures diminue et le défaut se développe selon une courbe non linéaire
- 4. Diagnostic du défaut, l'avertissement est donné, il y a lieu de programmer la réparation
- 4 à 5 : Surveillance accrue et décision de procéder à la réparation
- 5. Maintenance effectuée pour rétablir le niveau de tendance normal de la courbe de fonctionnement similaire à la partie 2 à 3 et un nouveau cycle reprend
- 5 à 6 : Tendance extrapolée à éviter
- 6. Panne inévitable qui représente le seuil maximum

Evolution paramètre significatif
Taux de panne, usure

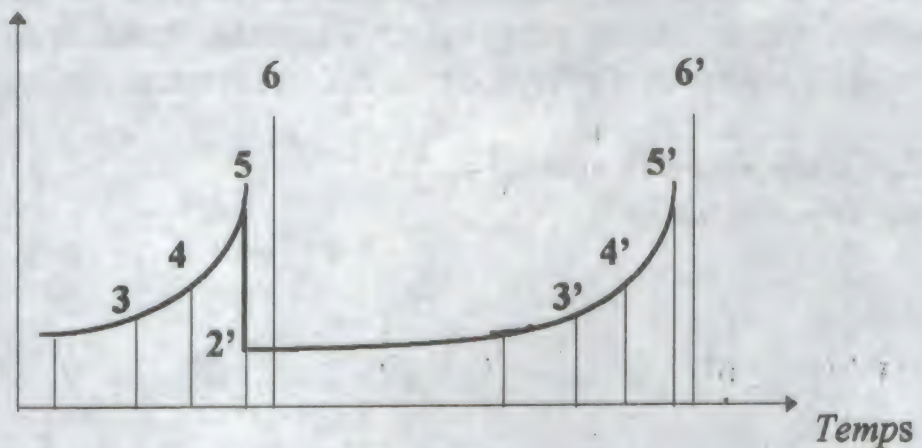


Figure 27

5 à 2' : Signifie que la maintenance a été effectuée et que la courbe a repris son allure de bon fonctionnement. La prochaine maintenance sera effectuée probablement au point 5'. Les cycles suivants sont similaires.

4.2.3.4. Bilan financier

Il faudrait évaluer le rapport coût par rapport au bénéfice des opérations nécessaires à la mise en place d'une politique de maintenance conditionnelle spécifiquement adaptée à son outil de production. Les propos ci-dessous mettent en lumière quelques uns des facteurs essentiels à considérer notamment :

Coûts

- recherches initiales, choix des points de surveillance et établissement des limites
- choix et achat de l'instrumentation
- formation du personnel pour les mesures et méthodes de suivi
- formation des ingénieurs pour l'exploitation des mesures

Economies

- accroissement du temps moyen entre chaque révision (augmentation de la longévité du matériel) c'est à dire productivité supérieure et coût de maintenance réduit
- élimination de fait des pannes inattendues donc fiabilité et productivité supérieures
- élimination des dommages dérivés par simple défaut
- élimination de gaspillage de pièces de rechange en exploitant au maximum les composant de leur vie utile
- réduction des stocks des pièces de rechange en prévoyant les besoins réels
- réduction des arrêts de production
- durée de réparation réduite puisque l'action nécessaire est planifiée
- une sécurité accrue
- la crédibilité des services entretien par objectifs et la maîtrise de la technologie

4.2.3.5. Les outils de la maintenance conditionnelle

Les éléments ou outils nécessaires à l'appréciation du degré d'usure pour approcher la loi de survie des équipements en maintenance prédictive doivent faire l'objet d'une application méthodologique et précise. Parmi ces outils nous énumérons particulièrement :

- la mesure et analyse des vibrations
- l'analyse des caractéristiques des huiles

- l'analyse stroboscopique pour l'étude des mouvements
- la détection des ultrasons pour la localisation des fuites
- les examens endoscopiques pour les cylindres de compresseurs, ailettes et engrenages
- les mesures des défauts de roulements et paliers
- la surveillance des niveaux de bruits acoustiques
- la dissipation d'énergie par thermométrie ou thermographie par infrarouge. Cette évaluation est un auxiliaire précieux dans les domaines aussi divers que l'échauffement de pièces mécaniques, l'état d'usure, la mise en évidence de défauts électriques. Comme beaucoup d'autres techniques d'examen des états de surface ou de structure des matériaux, les techniques thermiques dressent plus un état des lieux des défauts ou de dégâts que d'en donner une estimation quantitative.

La maintenance prévisionnelle et spécialement celle conditionnelle a pour objectifs de prévoir, déclencher et ajuster les opérations de maintenance selon des critères préétablis selon la causalité diagnostic et pronostic. Cela nécessite forcément :

- l'estimation de l'évolution dans le temps du comportement dynamique des machines et de leurs éventuels dysfonctionnement
- la comparaison à des modèles ou tendances d'usure
- l'évaluation des espérances d'utilisation avant réparation

Il est à remarquer qu'établir le comportement type moyen d'une machine et recenser ses dégradations les plus probables est un emploi difficile qui ne peut être mené à bien qu'en associant les avis du constructeur, l'exploitation systématique des incidents et expertises et l'usage des statistiques et normes relatives à ce type de machine.

4.2.3.6. Limites de la maintenance conditionnelle

A. Techniques

L'efficacité d'une maintenance conditionnelle est subordonnée à l'efficacité et à la fiabilité des paramètres de mesure qui la caractérisent.

Elle sera donc réservée aux matériels dont l'évolution d'éventuels défaut est facilement détectable et mesurables.

B. Economiques

Le choix du type de maintenance devra toujours résulter d'un compromis financier et technique qui est la recherche de plus de fiabilité possible au plus juste coût. Dans ce cas il va falloir quantifier en permanence les charges de la maintenance et n'appliquer la maintenance conditionnelle que si l'inéquation suivante est respectée :

Avantage de la maintenance conditionnelle > Coûts de la maintenance systématique ou corrective.

Algorithme du choix du type de maintenance

La panne a-t-elle une incidence sur la production ou sur la sécurité ?	Non	Le coût de panne est-il acceptable ?	Oui	Maintenance Corrective
		Non		
	Oui	Est-il possible d'utiliser des techniques de surveillance ?	Non	Maintenance Systématique
		Oui		
		L'utilisation de ces techniques est-elle rentable ?	Non	Maintenance Systématique
			Oui	Maintenance Conditionnelle

Synoptique récapitulatif

Type	Corrective	Systématique	Conditionnelle
Conditions d'intervention	Fonctionnement jusqu'à la rupture	Basée sur l'estimation de la durée de vie moyenne du composant	intervention conditionnée par la dérive d'un paramètre significatif
Aide au diagnostic	Les outils utilisés ne servent qu'à déterminer la cause de la panne	Ajuster les échéanciers en fonction des états d'usure constatés	Analyse de l'évolution des paramètres de fonctionnement et le diagnostic sur l'origine du défaut
Applications	Machines doublées, panne acceptable et imprévisible	Graissage, petites pièces et impossibilité d'obtenir des mesures fiables	Machines stratégiques, à problèmes et risque panne dangereuse
Durée de vie d'un organe	Rupture	Remplacement	Détection de défaut, analyse de tendance et réparation programmée
Coûts	Coûte cher en perte de production et en sécurité	Coûte cher en matériel	Optimise les coûts des matériels au plus près de la rupture et augmente la productivité par la programmation des arrêts nécessaires

4.3. Les opérations de maintenance

4.3.1. Le dépannage

C'est une action ou opération de maintenance corrective sur un équipement en panne en vue de la remettre en état de fonctionnement.

Cette action de dépannage peut s'accommoder de résultats provisoires et de conditions de réalisation hors règles de procédures, de coûts et de qualité, et dans ce cas sera suivie de la réparation.

Souvent les interventions de dépannage sont de courtes durées mais peuvent être nombreuses et n'exigent pas la connaissance du comportement des équipements et des modes de dégradation.

Le dépannage peut-être appliqué par exemple sur des équipements fonctionnant en continu dont les impératifs de production interdisent toute inspection ou intervention à l'arrêt.

4.3.2. La réparation

C'est une intervention définitive et limitée de maintenance corrective après panne ou défaillance. l'équipement réparé doit assurer les performances pour lesquelles il a été conçu.

La réparation peut-être décidée, après décision, soit immédiatement à la suite d'un incident, ou d'une défaillance, soit après un dépannage, soit après une visite de maintenance préventive conditionnelle ou systématique.

4.3.3. Les inspections

Ce sont des activités de surveillance consistant à relever périodiquement des anomalies et exécuter des réglages simples ne nécessitant pas d'outillage spécifique ni d'arrêt de l'outil de production ou des équipements.

4.3.4. Les visites

Ce sont des opérations de surveillance qui dans le cadre de la maintenance préventive systématique, s'opèrent selon une périodicité prédéterminée.

Ces intervention correspondent à une liste d'opérations définis au préalable qui peuvent entraîner des démontages d'organes et une immobilisation du matériel.

4.3.5. Les contrôles

Ils correspondent à des vérifications de conformité par rapport à des données préétablies suivies d'un jugement.

Le contrôle peut, comporter une activité d'information, inclure une décision, acceptation, rejet, ajournement, déboucher comme les visites sur des opérations de maintenance corrective.

Les opérations de surveillance (inspection, visite, contrôle) sont nécessaires pour maîtriser l'évolution de l'état réel du bien, effectuées de manière continue ou a des intervalles prédéterminés ou non, calculés sur le temps ou le nombre d'unités d'usage.

4.3.6. Les révisions

Ensemble des actions d'examens, de contrôles et des interventions effectuées en vue d'assurer le bien contre toute défaillance majeure ou critique, pendant un temps ou pour un nombre d'unités d'usage donné.

Il est d'usage de distinguer suivant l'étendue de cette opération les révisions partielles des révisions générales. Dans les deux cas, cette opération implique la dépose de différents sous-ensembles.

4.4. Les activités connexes de la maintenance

les activités connexes complètent les actions de maintenance et participent pour une part non négligeable à l'optimisation des coûts d'exploitation.

4.4.1. La maintenance d'amélioration

l'amélioration des bien d'équipement consiste à procéder à des modifications, des changements, des transformation sur un matériel correspondant à la maintenance d'amélioration.

Cependant, pour toute maintenance d'amélioration une étude économique sérieuse s'impose pour s'assurer de la rentabilité de projet.

Les améliorations à apporter peuvent avoir comme objectif l'augmentation des performances de production du matériel, l'augmentation de la fiabilité, c'est à dire diminuer les fréquences d'interventions, l'amélioration de maintenabilité (amélioration de l'accessibilité des sous-systèmes et des éléments à haut risque de défaillance), la standardisation de certains éléments pour avoir une politique plus cohérente et améliorer les actions de maintenance, l'augmentation de la sécurité du personnel.

L'amélioration concerne tous les matériels à condition que la rentabilité soit vérifiée.

4.4.2. La rénovation

inspection complète de tous les organes, reprise dimensionnelle complète ou remplacement des pièces déformées, vérification des caractéristiques et éventuellement réparation des pièces et sous-ensembles défectueux, conservation des pièces bonnes.

Commentaire : la rénovation apparaît donc comme l'une des suites possibles d'une révision générale au sens strict de sa définition.

4.4.3. La reconstruction

Remise en l'état défini par le cahier des charges initial, qui impose le remplacement de pièces vitales par des pièces d'origine ou des pièces neuves équivalentes.

La reconstruction peut être assortie d'une modernisation ou de modification.

Les modifications apportées peuvent concerner, en plus de la maintenance et de la durabilité, la capacité de production, l'efficacité, la sécurité, etc...

Actuellement entre la rénovation et la reconstruction, se développe une forme intermédiaire : « la cannibalisation ». Elle consiste à récupérer, sur du matériel rebuté, des éléments en bon état, de durée de vie connue si possible, et à les utiliser en rechanges ou en éléments de rénovation.

4.4.4. La modernisation

Remplacement d'équipement, accessoires et appareils ou éventuellement de logiciel apportant, grâce à des perfectionnements techniques n'existant pas sur le bien d'origine, une amélioration de l'aptitude à l'emploi du bien.

4.5. Les travaux neufs

L'adjonction à la fonction maintenance de la responsabilité des travaux neufs est très répandue, en particulier dans les entreprises de taille moyenne. Elle part du principe que, lors de tout investissement additionnel de remplacement ou d'extension, il est logique de consulter les spécialistes de la maintenance qui, d'une part, connaissent bien le matériel anciennement en place, et d'autre part auront à maintenir en état de marche le matériel nouveau. A partir de là, on prend souvent la décision de leur confier l'ensemble des responsabilités de mise en place des nouvelles

installations. On crée alors un service appelé « maintenance / travaux neufs ».

L'étendue des responsabilités en matière de travaux neufs est très variable d'une entreprise à l'autre. Il peut s'agir de la construction d'un quai ou d'un bâtiment, de la mise en place d'une machine achetée à l'extérieur (raccordement à la source d'énergie, etc.), ou même de la réalisation intégrale de la machine elle-même. Dans certains cas les « travaux neufs » auront recours à la fabrication de l'entreprise qui réalisera les commandes passées par eux-mêmes.

Notons que même si la fonction maintenance ne se voit pas adjoindre la fonction « travaux neufs », le service s'occupera des installations succinctes du type modifications (réfection d'un bureau, etc.).

4.6. La sécurité

la sécurité est l'ensemble des méthodes ayant pour objet, sinon de supprimer, du moins de minimiser les conséquences des défaillances ou des incidents dont un dispositif ou une installation peuvent être l'objet, conséquences qui ont un effet destructif sur le personnel, le matériel ou l'environnement de l'un et de l'autre.

Sachant qu'un incident mécanique, une panne, peuvent provoquer un accident..., sachant aussi que la maintenance doit maintenir en état le matériel de protection ou même que certaines opérations de maintenance sont elles-mêmes dangereuses, il apparaît que la relation entre la maintenance et la sécurité est particulièrement étroite.

Pour toutes ces raisons ainsi que pour sa connaissance du matériel, le responsable de la maintenance devra participer aux réunions du comité d'hygiène et de sécurité (CHS) en qualité de membre ou à titre d'invité, et développer sa collaboration avec l'ingénieur sécurité lorsque l'entreprise en possède un.

Dans une entreprise moyenne où la sécurité n'a pas de service propre, on trouve normal de faire appel au service maintenance pour les interventions concernant la sécurité.

5. DOSSIER MACHINE ET DOCUMENTATION TECHNIQUE

5.1. But de la documentation

L'homme de maintenance doit connaître parfaitement ses équipements et en nature et dans le temps. De ce fait, il est obligé de créer un système documentaire et, ou l'organiser. Ce système doit répondre à deux préoccupations :

- l'interrogation suivant le profil de l'information recherchée
- l'archivage du passé

La gestion de la documentation technique doit bénéficier d'une attention particulière car il arrive trop souvent qu'une documentation technique qui coûte assez chère, moyennant les 10% de l'investissement, se trouve égarée ou éparpillée dans plusieurs endroits de l'entreprise et donc inaccessible au moment voulu. La documentation technique devrait être codifiée sur la base d'un découpage de l'usine et centralisée dans le service méthode notamment.

Un système documentaire doit contenir les documents de base suivants :

- les manuels de description générale pour connaître le matériel et l'identifier
- les manuels d'exploitation
- les manuels des principes de fonctionnement
- les manuels de maintenance préconisée
- les plans comme construit ou "As Built"

En outre, les documents de maintenance doivent comprendre pour chaque type d'équipement :

- la description exacte du démontage et du remontage de l'équipement

- les différentes procédures de réglage
- les données et jeux concernant sa remise en marche
- les dessins techniques normalisés et à l'échelle
- la nomenclature des pièces de rechange constituant l'équipement avec toutes les références du constructeur ainsi que les nuances des matériaux de fabrication et les repères des pièces sur les plans et croquis
- les réquisitions et notices d'essais en usine et sur site de l'équipement en question
- la mise sur micro-fiches de tous les originaux est obligatoire

On doit exiger du fournisseur principal que tous les plans aient le même système de codification interne cohérent à la structuration de l'usine, qu'il s'agisse des constructeurs, fournisseurs ou leurs sous-traitants.

Chaque modification apportée aux installations, aussi mineure soit-elle, sera reportée immédiatement sur les copies des documents d'origine qui permettent la mise à jour.

Généralement l'acquisition de la documentation technique faite par des cahiers de charges non précis, ne répondant pas à un système d'organisation prévu, demeure incomplète et désordonnée. De ce fait, elle ne tient pas compte de tous les besoins et on rencontrera souvent des difficultés pour la recherche et l'exploitation de l'information.

5.2. Dossier machine

La documentation technique (plans, manuels, notices d'exploitation et entretien, etc.), base élémentaire de tout acte de maintenance, aussi bien palliatif que préventif, fait très souvent défaut. Autrement elle est soit incomplète, soit difficilement utilisable.

Généralement elle est rédigée dans une langue étrangère au milieu, donc non choisie et exigée, ou selon une mauvaise traduction. Des manques importantes au niveau des représentations graphiques telles que les vues éclatées ou les perspectives et surtout la standardisation ou normalisation qui y fait défaut.

Une déficience dans la documentation technique a toujours des conséquences néfastes et cela à plusieurs niveaux. Elle provoque une perte de temps énorme pour la recherche des pannes et leurs réparations, met en cause la sécurité des installations et entrave l'approvisionnement ou la confection des pièces de rechange.

Cependant, pour palier aux défauts énumérés et pour qu'il y ait de l'efficacité dans la recherche et l'exploitation, en temps réel, de la documentation technique, les services de maintenance doivent élaborer et tenir à jour des dossier machines.

Chaque dossier doit refléter la vie réelle de l'équipement depuis sa naissance jusqu'à sa totale obsolescence. C'est pourquoi un dossier machine doit impérativement inclure :

- une fiche technique
- un dessin technique
- une nomenclature des pièces de rechange
- une fiche d'entretien
- une fiche historique

5.2.1. Fiche technique

Pour connaître l'identification des équipements dont on a la tâche de les exploiter et de les entretenir au moindre coût possible en les gardant fiables et performants, nous devons les inventorier de manière à ce que toute information capitale susceptible à être utilisée devrait figurer sur une fiche appelée fiche technique. C'est pourquoi la fiche technique ayant un but informationnel devrait renseigner sur :

- l'identité de l'équipement par sa désignation complète
les caractéristiques principales : Type, Modèle, Numéro de Série,
par un système de code équipement
- la date de sa fabrication
- la date de sa fabrication
- la date de sa mise en service

- la localisation par rapport aux installations, aux blocs d'équipements, sur la machine même et sur les plans de construction. Un code peut traduire sa localisation
- les caractéristiques techniques de conception et de fonctionnement
- les références de la documentation technique relative à cet équipement
- le ou les constructeurs et fournisseurs par des indications commerciales (adresses, Téléphones et fax. ou télex)
- le nombre d'équipements similaires ou de même type se trouvant sur l'ensemble des installations à gérer avec localisation individuelle

La même fiche technique est valable pour les sous équipements . Selon la diversité des équipements ou leurs quantités, on choisi le mode de classement le plus approprié.

5.2.2. Dessin technique

Un dessin technique d'un sous-ensemble en coupe sert aussi bien à comprendre la constitution de celui-ci que son mécanisme ; c'est à dire son principe de fonctionnement. On pourra ainsi déceler plus facilement les pièces assujetties à usure et plus facilement définir le mode de son exploitation et par conséquent son mode d'entretien (montage, démontage, pièces d'usure, échéances d'intervention éventuellement, etc.)

Nous pourrons aussi savoir la configuration de chaque pièce constituante de l'ensemble et définir son rôle dans le mécanisme pour qu'on puisse juger du mode de sa fabrication (géométrie, matériau, état de surface, ajustement, tolérances, etc.)

5.2.3. Nomenclature des pièces de rechange

Le listing des pièces de rechange constituant un équipement donné va faciliter une tâche primordiale qui est aussi indispensable si non indissociable de la fonction entretien, à savoir la préconisation et la gestion des stocks, surtout dans un environnement non industriel.

En effet, ce listing va contenir :

1. les désignations de tous les constituants de l'équipement pièce par pièce
2. la référence du constructeur de chaque pièce
3. le repérage de chaque pièce sur le dessin
4. la quantité existante de pièces identiques sur cet ensemble
5. la matière ou nuance de fabrication de chaque pièce
6. les critères de gestion pour les pièces à stocker notamment la consommation moyenne annuelle pour en définir les stocks maximums et ceux d'alerte
7. la codification interne de chaque pièce qui pourra bien être celle de toute l'entreprise et pourquoi pas même nationale
8. le prix unitaire d'acquisition de chaque pièce

5.2.4. Fiche d'entretien

Nous avons vu précédemment que pour préserver les équipements, pour mieux produire, il fallait élaborer un organigramme détaillé de toutes les opérations de maintenance nécessaires pour chaque équipement pour une plotique donnée, quitte à le modifier au fil du temps selon l'expérience.

Cette fiche servira de guide, base impérative pour épargner dans le sens de préserver les équipements. L'entretien fondamental de premier ou deuxième niveau occasionne certes des charges mais évite la fréquence des pannes fortuites et donc se traduit par un accroissement du taux de fiabilité, d'exploitation et de sécurité.

La fiche d'entretien individuelle doit donc consigner :

1. l'inventaire des actions et opérations planifiées à entreprendre pour chaque ensemble (vidange, graissage, calibrage, contrôle, réglage, réparation, changement d'organe et autres)
2. les informations et spécifications utiles (nature, quantités, données, ...) pour chaque type d'intervention par un code entretien

3. éventuellement la périodicité ou échéancier entre deux opérations identiques d'entretien (quotidien, hebdomadaire, mensuel ou en nombre d'heures de fonctionnement)

5.2.5. Historique des équipements

La fiche historique ou fiche de suivi des travaux d'entretien doit refléter la vie de l'équipement en intégrant toutes les anomalies, pannes et interventions qu'a subies cet équipement. L'historique financier doit être de paire et y figurer du fait que toutes les prestations sont valorisées.

Cette fiche doit donc indiquer principalement :

- l'identification et les caractéristiques principales de l'équipement par le code équipement
 - les références de la demande des travaux, de l'ordre de travail et du rapport d'intervention
 - la désignation des travaux effectués
 - la date de début des travaux
 - la date de fin des travaux et éventuellement les cumuls horaires
 - les remarques, causes et remèdes
- les coûts des opérations (main d'œuvre, transport, manutention, spécifiques, pièces de rechange, ingrédients, manque à gagner)
- toutes les observations utiles et spécifiques à la gestion qualitative de cet équipement en vue de tenir compte lors des prochaines interventions

6. COÛTS DE LA MAINTENANCE

6.1. Composition des coûts

Le contrôle des coûts de maintenance est la base essentielle pour l'identification des équipements gros consommateurs de budget d'entretien et des pratiques opérationnelles trop coûteuses. Pour cela, la pratique d'une comptabilité analytique, par centre de coût, est indispensable pour traiter les informations sur les coûts et les présenter d'une manière exploitables pour la maintenance.

Le coût d'une panne ou intervention en entretien se décompose de trois éléments essentiels notamment :

1. Coûts directs ou coûts de la consommation des ressources :

- main d'œuvre
- équipements (machines à utiliser pour réparer les équipements principaux)
- accessoires ou outillage
- fourniture, consommables et ingrédients

2. Coûts indirects de la non création des ressources :

- manque à gagner
- temps improductifs

3. Coûts indirects aussi de la consommation des ressources induites

- pénalités de retard
- travaux administratifs imputables à la maintenance

Le contrôle des coûts d'une opération de maintenance requiert les systèmes de base suivants :

- mesure des répartitions du travail
- informations sur les coûts actuels
- comparaison avec les standards
- mesures correctives à adopter

La détermination des dépenses en maintenance utilise généralement le modèle de la valeur espérée ou critère de Bayles qui donne une approche concrète des coûts. Nous donnons un exemple pour illustrer cette approche.

Exemple

Soit un équipement dont les données statistiques sur deux années de service sont les suivantes :

Nombre de pannes dans un mois	0	1	2	3	4
Nombre de mois où il y avait eu des pannes	2	8	10	3	1

Sachant que le coût moyen pondéré d'une panne est de 1.200,00 DA, il s'agit de calculer le budget annuel espéré.

Nombre de pannes dans un mois	Fréquence en mois	Fréquence en %	Valeur espérée
n	F(n)	P(n) = F(n)/24	n . P(n)
0	2	0,083	0
1	8	0,333	0,333
2	10	0,417	0,834
3	3	0,125	0,375
4	1	0,042	0,168

Le total des valeurs espérées T représente le nombre moyen de panne par mois :

$$T = \sum n.P(n) = 1,710 \text{ pannes par mois}$$

La moyenne pondérée des pannes annuelles est de :

$$1,710 \times 12 = 20,52 \text{ pannes par an}$$

Le budget annuel espéré sera de :

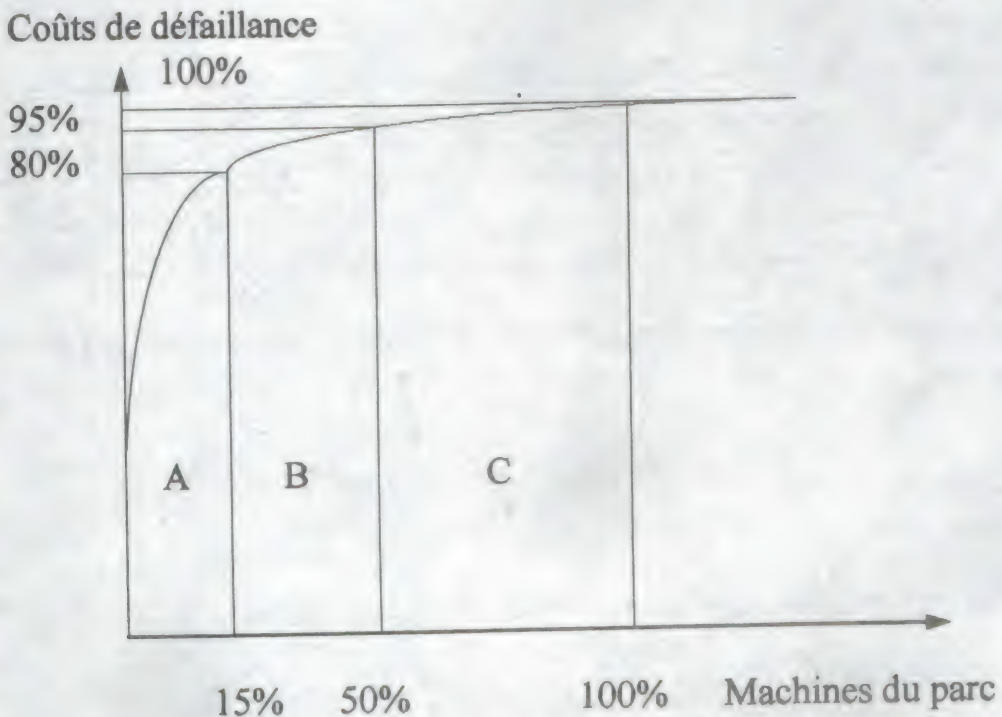
$$20,52 \times 1.200,00 \text{ DA} = 24.624,00 \text{ DA}$$

6.2. Analyse des coûts et méthode ABC

Si l'on calcule le coût de défaillance global qui est égale à la somme du coût d'entretien et des pertes de production pour les machines d'un parc, et l'on dresse le graphique après les avoir classées par ordre décroissant, on trouve généralement les résultats dans les limites habituelles de :

- A. 15 à 20 % des machines provoquent environ 80 % des coûts de défaillance
- B. 30 à 35 % des machines provoquent environ 15 % des coûts de défaillance
- C. 50 % des machines provoquent environ 5 % des coûts de défaillance

Ces résultats sont connus sous l'analyse ou méthodes ABC et applicables à presque tout ensemble de machines dans un milieu industriel.



Dans un parc ou ensemble de machines à entretenir, le nombre d'équipements à suivre est très élevé, d'où de très fortes exigences d'entretien seront prescrits. Or, on ne peut jamais apporter le même soin à l'ensemble de ces équipements. De ce fait, il y a lieu de les classer selon les

priorités de la courbe ABC. Dans ce cas, il apparaît bien que si l'on s'occupe et l'on gère convenablement que la catégorie A de manière rigoureuse, le budget de maintenance est déjà consommé et maîtrisé à 80 %.

Il faudrait donc autoriser dans de telles conditions plusieurs politiques ou modes d'entretiens, comme par exemple le curatif et le préventif, mais la priorité sur la tranche A revient à mesurer une efficacité représentée par :

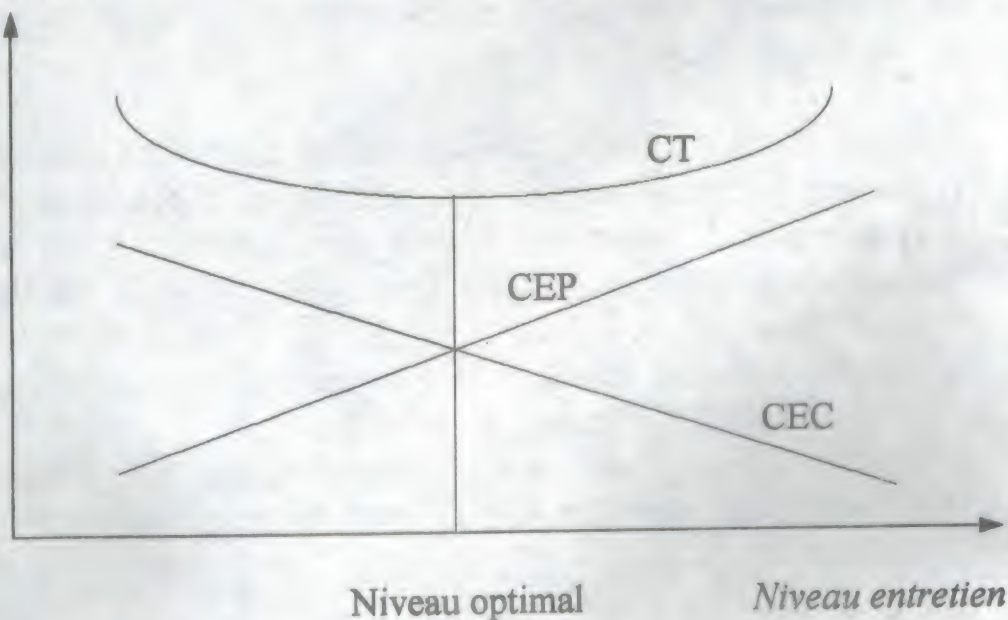
- une rapidité d'étude de 20 % seulement des équipements à suivre minutieusement
- un gain maximum portant sur 80 % des coûts à gérer

De cette manière, à son tour la catégorie B sera plus suivie que la catégorie C qui représente la plus faible consommation.

6.3. Entretien préventif optimal

Les coûts de maintenance augmentent avec la pratique de l'entretien préventif alors que ceux de l'entretien curatif diminuent en fonction du temps pour un même système. Il s'agit alors de trouver un compromis entre ces deux modes d'entretien afin d'optimiser le niveau d'entretien préventif à adopter. Représentons graphiquement les allures de ces deux modes d'entretien comme suit :

Coût Total



$$\text{Coût Total} = \text{Coût Entretien Préventif} + \text{Coût Entretien Curatif}$$

$$\text{CT} = \text{CEP} + \text{CEC}$$

Cependant la recherche de ce niveau optimal où le coût total est minimisé est facilitée lorsqu'il s'agit d'entretenir des pièces d'usure simples dont on connaît bien les caractéristiques et le comportement. A l'aide des probabilités, on peut connaître :

- la durée de vie moyenne ou MTBF (Moyenne des Temps de Bon Fonctionnement)
- la loi d'usure ou probabilité d'avarie avec le temps
- les coûts de remplacement et leur optimisation

Mais il est plus intéressant, dans le cas général, de déterminer ce niveau d'entretien optimal avec des installations d'équipements complexes. Là, la recherche de ce niveau est très délicate; c'est pourquoi il faudrait le déterminer empiriquement, en se basant sur les coûts de défaillance pratiqués en tenant compte :

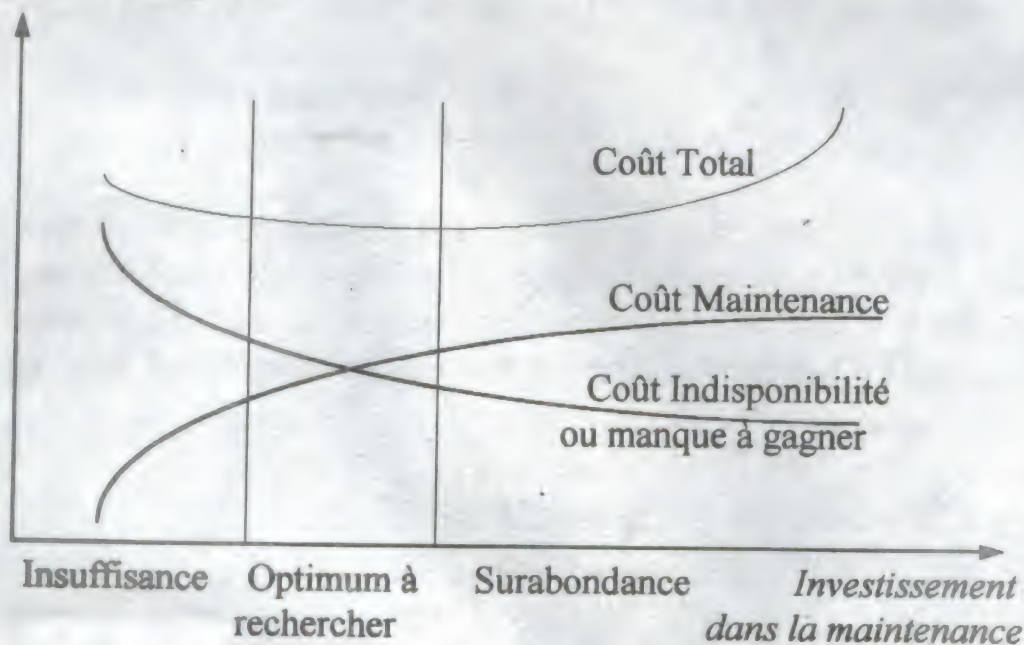
- des coûts d'entretien
- des coûts du manque à gagner

et avoir recours à l'établissement de la courbe ABC. Il s'agit donc de s'intéresser en priorité à la famille d'équipements A en optant pour le préventif. Dans ce cas, il faudrait alors :

- déterminer la nature (périodicité et coûts) des actions d'entretien
- calculer, à chaque fois, le coût de défaillance pour une période donnée et le comparer avec le coût de référence pour une période identique pour pouvoir décider de retenir toujours cet entretien ou de le rejeter
- chercher à rendre homogène les périodicités des éléments de la famille dont on a optimisé l'entretien préventif
- vérifier l'impact de cette homogénéisation sur l'économie précédemment déterminée et décider de retenir ou rejeter cette périodicité.

Nous illustrons ci-après graphiquement l'influence des coûts directs et indirects sur les investissements en maintenance.

Coûts pour l'entreprise



6.4. Exemple de calcul de la MTBF

Pour une pièce donnée, on recueille les valeurs du tableau ci-dessous :

Intervalles de temps [mois]	Nombre de pièces usées [P]	Durée de vie par pièce [M]	Durée de vie globale [D=P.M]	Cumul des durées globales [mois]
0 à 1	4	1	4	4
1 à 2	3	2	6	4+6=10
2 à 3	4	3	12	10+12=22
3 à 4	1	4	4	26
4 à 5	2	5	10	36
5 à 6	1	6	6	42
6 à 7	1	7	7	49
7 à 8	1	8	8	57
8 à 9	2	9	18	75
9 à 10	3	10	30	105
10 à 11	3	11	33	138
Total	25			

$$\text{MTBF} = 138 \text{ mois} / 25 \text{ pièces} = 5,5 \text{ mois}$$

On peut considérer que ces 25 pièces ont la même durée de vie moyenne qui es égale à leur MTBF, soit 5,5 mois.

Ainsi le nombre moyen mensuel de pièces défailantes sera de :
 $25 \text{ pièces} / 5,5 \text{ mois} = 4,54 \text{ pièces}$

Dans ce cas, chaque mois on doit donc remplacer en moyenne 5 pièces. Ainsi on pourra facilement prévoir les coûts de défaillance. Pour déterminer exactement le nombre de pièce à remplacer, il faudrait avoir les probabilités d'avarie avec le temps pour chaque intervalle de temps.

6.5. Optimisation du remplacement par l'utilisation du modèle des probabilités

La recherche de l'efficacité économique de la maintenance préventive et son niveau optimal peut être rendue aisée par l'utilisation du modèle des probabilités lorsque cette maintenance consisite essentiellement à remplacer un certain nombre d'organes identiques en même temps et de façon systématique c'est à dre quelque soit le degré d'usure.

Le principe du modèle repose sur la comparaison des coûts de la politique de remplacement unitaire, c'est à dire après défaillance, ou politique de maintenance préventive avec les coûts des différentes politiques de remplacement systématique.

Il existe en effet différentes politiques de remplacement systématique ou maintenance préventive puisqu'à chaque période de remplacement va correspondre une politique donnée.

Les coûts de chaque politique de maintenance préventive vont inclure le coût du remplacement systématique et le coût des remplacements unitaires qu'il aura fallu opérer durant l'intervalle qui sépare deux remplacements systématiques.

La mise en œuvre du modèle présuppose donc la connaissance des coûts de remplacement unitaires et systématique d'une part et du nombre de remplacements unitaires nécessaires pour chaque intervalle de remplacement systématique d'autre part.

La connaissance du nombre de remplacement repose sur la disponibilité de l'information relative aux probabilités d'avarie.

Exemple

Soit à gérer le remplacement de courroies dans un équipement donné. Dressons les hypothèses de remplacement ou politiques d'entretien :

H0 : hypothèse qui correspond au remplacement unitaire c'est à dire que la maintenance préventive n'est pas pratiquée. Dans ce cas on procèdera donc au remplacement des courroies une fois qu'elles sont défaillantes au rythme de une par une.

H1 : hypothèse qui correspond au remplacement systématique effectué tous les mois. L'intervalle de remplacement sera de un mois et on procèdera en plus au remplacement unitaire des courroies défaillantes durant ce mois.

H2 : hypothèse de remplacement systématique tous les 2 mois avec remplacement unitaire des courroies défaillantes pendant l'intervalle de 2 mois.

H3, H4, H5 et H6 : hypothèses de remplacement systématique tous les 3, 4, 5 et 6 mois avec remplacement unitaire des courroies défaillantes pendant l'intervalle de 3, 4, 5 et 6 mois respectivement.

Calcul des coûts

1. Coût de la politique de remplacement unitaire ou de maintenance curative (CH0)

Connaissant le nombre de remplacement moyen mensuel (Mm) et le coût d'un remplacement unitaire (U), on peut déterminer le coût (CH0) de cette politique.

$$Mm = N0 / MTBF \text{ où } N0 \text{ représente 1 mois}$$

$$\text{Donc : } CH0 = Mm \cdot U$$

2. Coût des différentes politiques de remplacement systématique ou de maintenance préventive (CHn)

Ce coût mensuel de la politique de remplacement systématique tous les n mois (CHn) inclut les charges relatives au remplacement systématique et celles relatives au remplacement unitaire nécessaire durant l'intervalle de remplacement

$$CHn = \frac{S + Rn \cdot U}{n}$$

où :

- S : coût de remplacement systématique
- $Rn = \sum r_i$ avec $i=1$ à n et r_i est le nombre de remplacements unitaires durant le mois i
- n : nombre de mois compris dans l'intervalle de remplacement

Application numérique

Données : Les valeurs des coûts son en DA

$$Mo = 27$$

$$U = 100,00$$

$$S = 2000,00$$

r1	r2	r3	r4	r5	56
20,00	19,00	16,80	18,21	30,06	39,32

Calculons les deux coûts des deux différentes politique :

1. Remplacement unitaire

$$\underline{CH0} = Mm. U = 27. 100 = \underline{2700,00}$$

2. Remplacement systématique

Calculons d'abord les R_n

$$R1 = r1 = 20$$

$$R2 = r1 + r2 = 20 + 19 = 39$$

$$R3 = r1 + r2 + r3 = R2 + r3 = 39 + 16,8 = 55,80$$

$$R4 = r1 + r2 + r3 + r4 = R3 + r4 = 55,80 + 18,21 = 74,01$$

$$R5 = r1 + r2 + r3 + r4 + r5 = R4 + r5 = 74,01 + 30,06 = 104,07$$

$$R6 = r1 + r2 + r3 + r4 + r5 + r6 = R5 + r6 = 104,07 + 39,32 = 143,39$$

Dressons le tableau des valeurs suivant pour les 6 mois

n	S	R_n	$R_n . U$	CH_n
1	2000,00	20,00	2000,00	4000,00
2	2000,00	39,00	3900,00	2950 ;00
3	2000,00	55,80	5580,00	2526,67
4	2000,00	74,01	7401,00	<u>2350,25</u>
5	2000,00	104,07	10407,00	2481,40
6	2000,00	143,39	14339,00	2723,17

Il apparaît donc que la politique de remplacement systématique tous les 4 mois est optimale. Elle permet de faire une économie par rapport à la politique de remplacement unitaire de : $2700,00 - 2350,25 = 349,75$, soit un gain de l'ordre de 13 % sur les dépenses relatives au remplacement.

7. REMPLACEMENT D'EQUIPEMENTS

7.1. Choix entre le maintien et le remplacement

Le remplacement d'un matériel usé pose de sérieux problèmes aux responsables de production et financiers, mais aussi à la maintenance. Prolonger la vie d'un matériel coûte cher en maintenance et il est bon de savoir informer la direction quand sa maintenance n'est plus économique.

Le calcul du coût moyen annuel (Cma) de fonctionnement permet d'éclairer la décision. Ce coût calculé sur n années est le suivant :

$$C_{ma} = \frac{\text{Achat} + \text{Maintenance Cumulée} - \text{Valeur Résiduelle}}{n}$$

Le coût de la maintenance cumulée comporte toutes les actions directes et indirectes de toutes les opérations de petites et grosses réparations.

La valeur résiduelle est généralement appelée aussi le coût vente de l'épave.

A noter que l'ensemble constitué par une machine et la machine même achetée en remplacement après une avarie grave ou une décision de remplacement est considérée comme un seul équipement.

Au niveau de la fonction maintenance, ce calcul donne une première approche, qui sur le plan financier, doit être actualisée.

7.2. Durée de vie économique

Tout équipement a une durée de vie limitée dans le temps. Il est de ce fait, appelé à être remplacé à terme. Nous allons ici envisager quelles sont les causes et les critères qui justifient le remplacement d'un équipement.

Les investissements de remplacement sont directement liés à :

- l'état du matériel
- sa disponibilité
- sa fiabilité

Seule la maintenance détenant ce type d'informations technico-économiques, peut aider à la détermination de l'amortissement maximum d'un équipement.

Les causes essentielles d'un remplacement sont :

1. l'usure qui résulte de l'utilisation de l'équipement dans le processus de production ainsi que l'action du milieu sur cet équipement. Elle est donc liée directement au taux et conditions d'utilisation.
2. l'obsolescence qui est définie par le vieillissement économique ou technologique surtout. Elle résulte principalement du progrès technique et conduit à mettre hors d'usage des équipements avant même que leur comportement technique ne soit justifiée.

Le critère fondamental de remplacement consiste en la détermination de la durée d'utilisation d'un équipement donné en comparant ses coûts de défaillance avec les coûts de son remplacement.

Le coût de défaillance influe directement sur celui d'utilisation d'un équipement. La formalisation mathématique de ce dernier paramètre est la suivante :

$$C = I + M$$

où :

- C : Coût d'utilisation

I : Investissement majoré du coût de mise en service et de mise au point

M : Coût cumulé de maintenance comportant les coûts de défaillance directs et indirects

Sachant que le coût de maintenance cumulé M est une fonction exponentielle dans le temps, il prend ainsi la forme mathématique suivante :

$$M = a \cdot t^m$$

où :

- a : coefficient dit de maintenance
- t : temps écoulé
- m : exposant positif ($m > 0$)

Le coût d'utilisation C devient :

$$C = I + a \cdot t^m$$

Le but est de chercher à réduire le coût C pour une durée de vie t relativement élevée. Cela revient à minimiser la quantité C/t , autrement :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{C}{t} \right) = 0$$

Et l'on obtient la durée économique t_e au coût économique Me

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{C}{t} \right) = \frac{d}{dt} \left(\frac{I}{t} + \frac{a \cdot t^m}{t} \right) = 0$$

Ce qui donne :

$$\frac{-I}{t^2} + (m-1) \cdot a \cdot t^{m-2} = 0 \quad \text{pour } t \neq 0$$

$$t_e = \sqrt[m]{\frac{I}{(m-1) \cdot a}} \quad \text{ou} \quad a \cdot t_e^m = \frac{I}{m-1} = Me$$

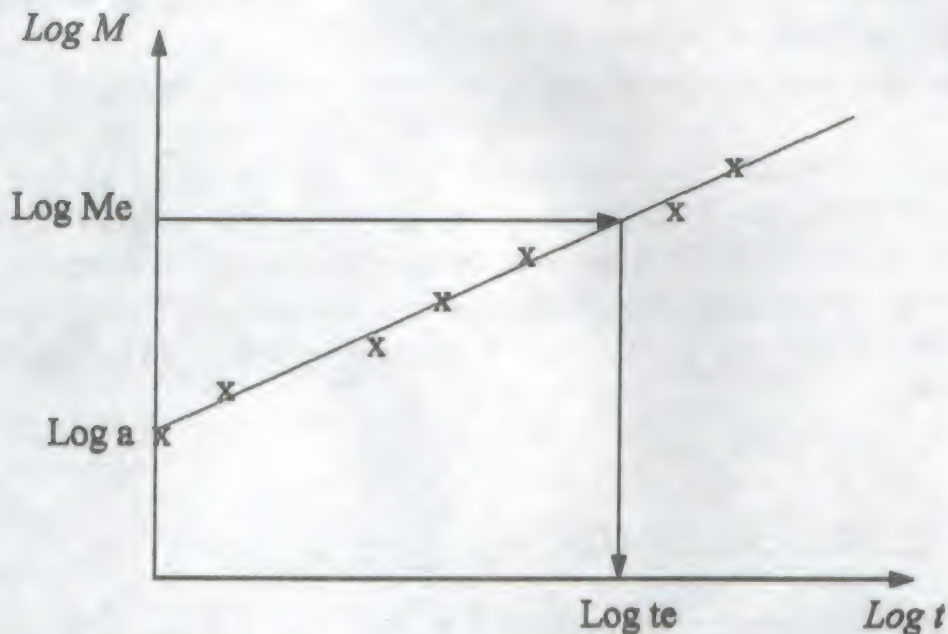
Déterminons pratiquement les valeurs de m et a .

Ecrivons la fonction $M = a \cdot t^m$ sous forme logarithmique :

$$\text{Log } M = \text{Log } a + m \cdot \text{Log } t$$

Si on porte sur une échelle doublement logarithmique les valeurs de M en ordonnées et de t en abscisse, on obtiendra une série de points situés de part et d'autre d'une droite qu'on pourra tracer. L'ordonnée à l'origine de cette droite permettra de calculer la valeur de a . La valeur de m sera égale à la pente de cette droite.

$$m = \frac{\text{accroissement Log } M}{\text{accroissement Log } t}$$



Connaissant m et I et ayant déterminé $\text{Log } a$ donc a , on calculera M_e :

$$M_e = \frac{I}{m - 1} \text{ et l'on déterminera } \text{Log } t_e \text{ c'est à dire } t_e.$$

Graphiquement, on indiquera M_e sur la droite, c'est à dire $\text{Log } M_e$ et on déterminera directement $\text{Log } t_e$, c'est à dire la valeur t_e .

Cette durée de vie économique est souvent très élevée si les coûts de défaillance ne croissent pas rapidement dans le temps.

Il existe un autre critère de remplacement d'équipement qui est le taux interne de rentabilité. C'est un taux d'intérêt composé qui établit l'identité entre la valeur actuelle des résultats de trésorerie et la la valeur actuelle des dépenses d'investissements, pour la durée de vie envisagée de l'investissement. Pour un taux d'intérêt déterminé, la différence entre les valeurs actuelles des résultats de trésorerie et d'investissement s'appelle le profit actualisé. Le taux interne de rentabilité est donc l'intérêt qui rend nul le profit actualisé. Le taux interne de rentabilité est la valeur de i qui satisfait à la relation :

$$I = \frac{B_1}{(1+i)} + \frac{B_2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{B_n}{(1+i)^n} + \frac{I_R}{(1+i)^n}$$

- I : montant de l'investissement
 B_1, B_2, \dots, B_n : le résultat brut obtenu après impôts à la fin de chaque année de la durée de vie
- I_R : la valeur résiduelle de l'investissement à la fin de l'année n

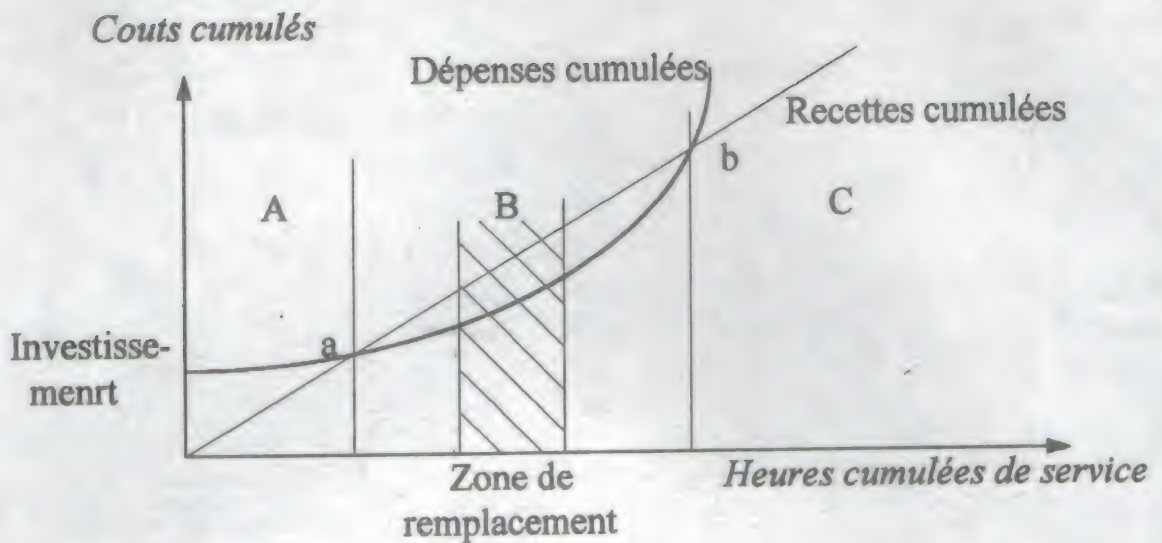
Ce taux interne de rentabilité pour un équipement dont le remplacement s'effectue à la fin de sa vie économique n'est généralement pas élevé. C'est pourquoi, il est en fin de compte très important de choisir un matériel de remplacement plus performant qui permettra un accroissement substantiel des bénéfices, c'est à dire du profit actualisé ou du taux interne de rentabilité.

7.3. Déclassement de matériel

Une question très épineuse surgit : à partir de quelle période vaut-il mieux déclasser un matériel ? Nous allons essayer de répondre à cette question dans trois cas de figures.

7.3.1. Premier cas

Dans le cadre de la comptabilité analytique, nous pourrions saisir les différents coûts et éventuellement la recette du service rendu. Cette exploitation est rentable dans la mesure où la droite représentant les recettes cumulées coupe la courbe des dépenses cumulées en deux points. Ces deux points a et b délimitent la durée de service en trois zones A, B et C.



La zone A représente la zone où la rentabilité de l'équipement n'est pas encore réalisée. En fin de cette zone nous avons l'égalité des recettes et dépenses au point a.

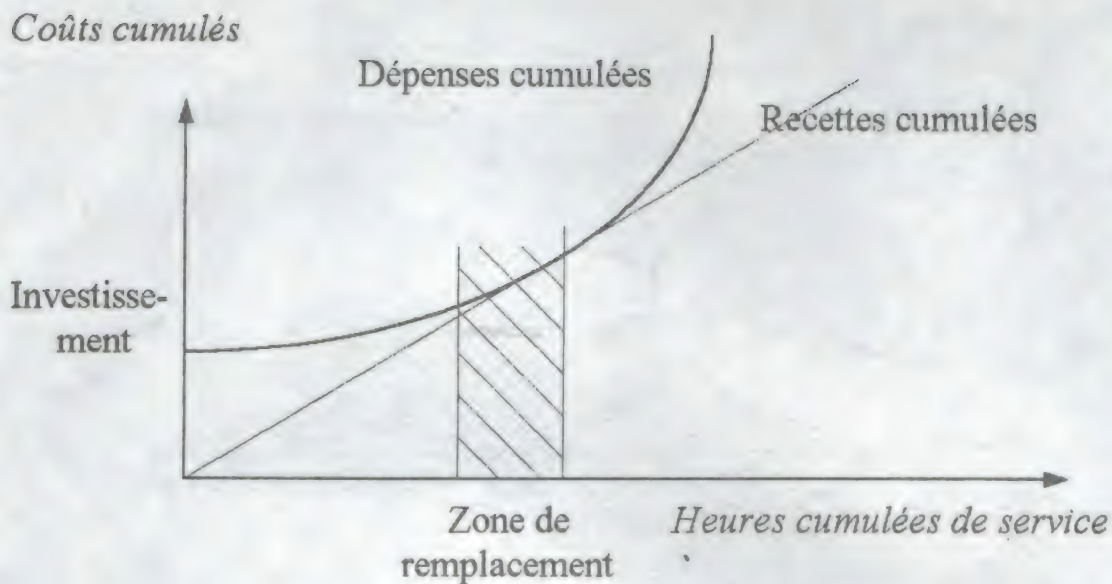
La zone B représente la zone où la rentabilité de l'équipement est réalisée. Nous avons les recettes supérieures aux dépenses entre les points a et b.

la zone C représente la zone où l'exploitation devient non rentable, particulièrement à partir du b où les dépenses seront supérieures aux recettes.

A noter que si l'axe des abscisses est souvent représenté par des heures de fonctionnement, nous pouvons avoir également comme unité d'usage des quantités de produits fabriqués, des distances parcourues, des longueurs produites, etc.

7.3.2. Deuxième cas

Si la valeur du service rendu (recettes) reste constante dans le temps en monnaie constante tel que schématisé ci-dessous, il est indispensable d'en tenir compte.



Pour des valeurs identiques de dépenses nous aurons des résultats identiques.

Si les dépenses de fonctionnement sont constantes dans le temps en monnaie constante, l'étude pourra se faire uniquement avec les coûts liés à la maintenance.

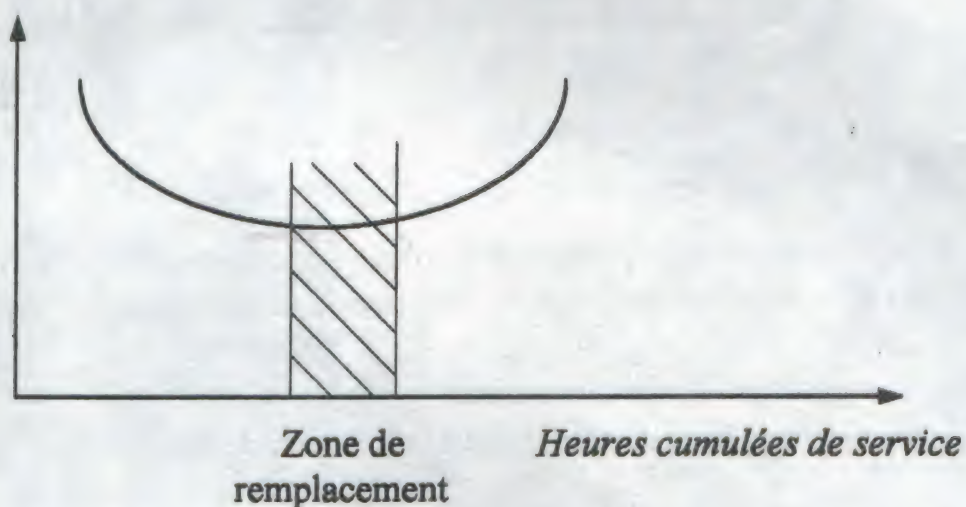
7.3.3. Troisième cas

Si nous intégrons la dépréciation du capital dans le temps, nous constatons que cette dépréciation dans le temps diminue fortement au début de la vie de l'équipement, que le coût de fonctionnement et de maintenance augmentent peu.

Ces deux éléments évoluant en un sens inverse, l'optimum de remplacement sera trouvé lorsque le total cumulé par unité d'usage sera minimum.

Toute l'approche sur la politique d'investissement est faite à partir des coûts cumulés et non des coûts par période donnée. Nous pensons qu'il est préférable d'agir ainsi car l'analyse à partir des coûts non cumulés aurait pour inconvénient de mettre en évidence des défaillances aléatoires à coût élevé. Dans ce cas nous serions amené à agir prématurément.

Coûts cumulés



Pour effectuer les cumuls, nous devons analyser des valeurs homogènes. Il faut donc calculer les frais de fonctionnement en "monnaie courante" année par année si bien sûr la période de référence retenue est l'année et les transformer en "monnaie constante", c'est ce qu'on appelle l'actualisation.

8. LA MAINTENANCE PREDICTIVE BASEE SUR LES VIBRATIONS MECANQUES

8.1. Généralités

La maintenance prédictive dite aussi conditionnelle est devenue de nos jours un impératif industriel car elle offre deux avantages :

- une production constante
- une réduction des frais d'exploitation de 10 à 25 %

Pour mettre en évidence les défauts de fonctionnement et les dégradations des machines tournantes, la maintenance prévisionnelle fait très souvent appel à plusieurs techniques simultanément :

- surveillance des paramètres de fonctionnement tels que les températures, les pressions d'huiles, les rendements énergétiques
- surveillance des niveaux de bruit acoustique
- surveillance des paliers, des carters par thermographie infrarouge
- analyse des gaz de combustion
- mesure et analyse des vibrations mécaniques

Parmi les outils de la maintenance conditionnelle, il serait incensé de parler maintenance prédictive sans pour autant citer l'analyse vibratoire.

La variété, la richesse et la précision des renseignements fournis par les mesures et analyses des vibrations mécaniques tant pour les machines tournantes que pour les structures d'accueil des équipements, en font l'outil principal de la maintenance conditionnelle.

8.2. Analyse vibratoire

Toutes les machines en fonctionnement produisent des vibrations. La détérioration du fonctionnement se traduit par une modification de

répartition de l'énergie vibratoire conduisant le plus souvent à un accroissement du niveau des vibrations.

Les vibrations mécaniques en tant qu'image des efforts dynamiques, des défauts ou dommages, occupent une place privilégiée parmi les techniques utilisées en maintenance conditionnelle.

Le diagnostic vibratoire est prévisionnel : toute modification de la signature vibratoire d'une machine est la première manifestation d'une anomalie, cause potentielle de dégradation, alors que les autres manifestations telles que échauffement de palier, présence de particules métalliques dans les huiles, etc., sont les conséquences de la dégradation et n'apparaissent de manière significative, parfois trop tard juste avant la panne.

Le diagnostic vibratoire est le plus complet et le plus précis car toute anomalie de fonctionnement se traduit par des vibrations ayant un contenu fréquentiel ou temporel caractéristique que l'on peut identifier, isoler et suivre de façon sélective.

Un diagnostic évolué, réellement préventif consiste à :

- déterminer l'organe défaillant de la machine
fixer avec sûreté la date à laquelle s'impose l'intervention pour être en mesure de planifier l'arrêt de production et d'approvisionner les pièces de rechange
- détecter les origines et les causes des désordres mécaniques

La politique de maintenance prévisionnelle d'une entreprise industrielle sera dépendante :

- du secteur industriel et du parc de machines
- de la nature et de la puissance des machines
de l'usage et de l'importance stratégique de ces machines dans la production
de la connaissance et de l'expérience acquises sur ce type de machines
- du matériel de mesure et d'analyse

- du niveau de qualification des opérateurs de maintenance

Les technologies très diverses de construction, comme les grandes différences d'impédance mécanique d'une machine à l'autre font que le niveau vibratoire en soi n'est pas significatif de l'état de la machine.

C'est l'évolution des niveaux et des signatures vibratoires à partir de l'état neuf ou rénové qui est l'indicateur le plus fiable de l'état des machines tournantes ou de leurs sous-ensembles : une augmentation d'un facteur de 2,5 soit 8 décibels du niveau vibratoire fait passer d'une classe de comportement vibratoire à une autre (principe des normes AFNOR)

8.3. Origine des vibrations

Le principe de l'analyse des vibrations est basé sur l'idée que les structures de machines, excitées par des efforts dynamiques, donnent des signaux vibratoires dont la fréquence est identique à celle des efforts qui les ont provoquées, et la mesure globale prise en un point est la somme des réponses vibratoires de la structure aux différents efforts excitateurs.

On peut donc, grâce à des capteurs placés en des points particuliers, enregistrer les vibrations transmises par la structure de la machine et, grâce à leur analyse, identifier l'origine des efforts auxquels elle est soumise.

De plus si l'on possède la signature vibratoire de la machine lorsqu'elle était neuve, ou réputée en bon état de fonctionnement on pourra, par comparaison apprécier l'évolution de son état ou déceler l'apparition d'efforts dynamiques nouveaux, consécutifs à une dégradation en cours de développement.

La mesure d'une vibration transmise par la structure d'une machine sous l'effet d'efforts dynamiques sera fonction de multiples paramètres que l'on peut séparer en trois groupes :

1^o groupe :

Eléments caractéristiques de la structure regroupés sous le terme "fonction de transfert" :

masse, rigidité et coefficient d'amortissement de la structure qui véhicule les vibrations

caractéristiques de fixation de la machine sur le sol qui oppose des réactions aux vibrations et en modifie l'intensité

- positionnement de la prise de mesure

2° groupe :

Paramètres concernant les caractéristiques de la chaîne de mesure que l'on doit s'efforcer de rendre invariables d'une mesure à une autre :

- position et fixation du capteur sur la machine
- caractéristiques du capteur
- préamplification et transmission du signal
- performance de l'appareil analyseur

3° groupe :

- vitesse de rotation et puissance absorbée
état des liaisons de la chaîne cinématique : alignement, balourd, engrenages, roulements, etc.

Les éléments du troisième groupe sont en fait ceux qui sont directement liés à l'intensité des efforts dynamiques qui font naître la vibration, mais qu'il est impossible de mesurer directement, sans passer par l'amplification inévitable des paramètres des deux autres groupes.

Il convient donc de garder à l'esprit que les techniques d'analyse des vibrations ne donnent pas l'intensité intrinsèque d'une force parasite, révélatrice d'un défaut, mais permettent d'en suivre l'évolution. C'est pourquoi, il est plus facile d'effectuer un diagnostic en regardant l'évolution dans le temps des vibrations.

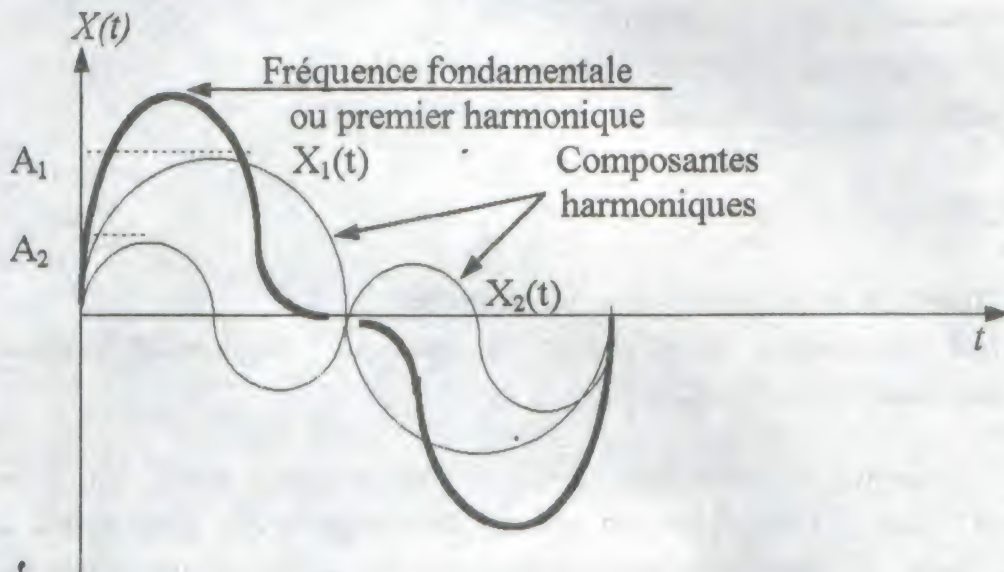
8.4. Nature des vibrations

Les vibrations mécaniques sont des mouvements oscillants autour d'une position moyenne d'équilibre. Ces mouvements oscillants, caractéristiques de l'effort qui les génère, peuvent être, soit périodiques, soit

apériodiques (c'est à dire transitoires ou aléatoires) selon qu'ils se répètent ou non, identiquement à eux mêmes après une durée déterminée.

8.4.1. Les vibrations périodiques

Elles peuvent correspondre à un mouvement sinusoïdal pur comme celui d'un diapason ou, plus généralement, à un mouvement complexe périodique que l'on peut décomposer en une somme de mouvements, plus faciles à analyser.



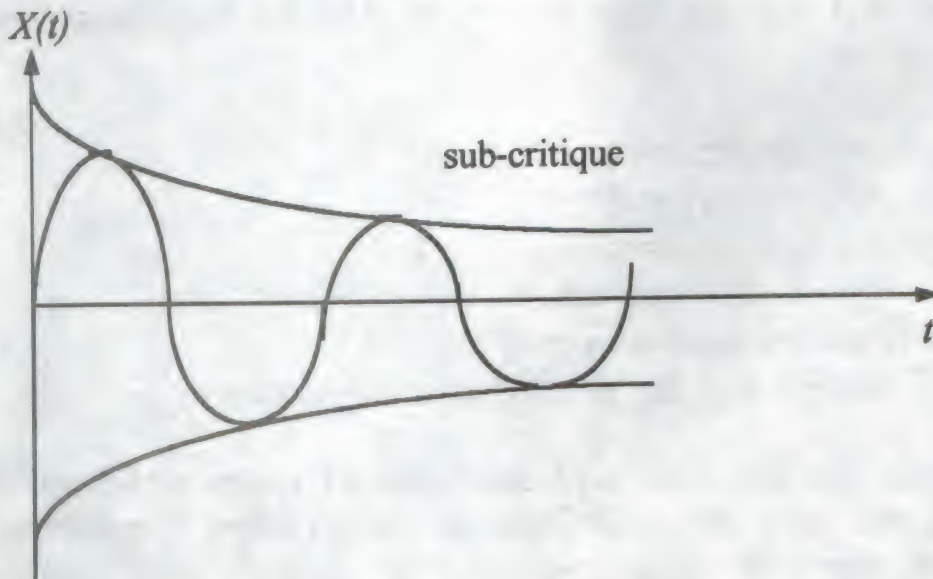
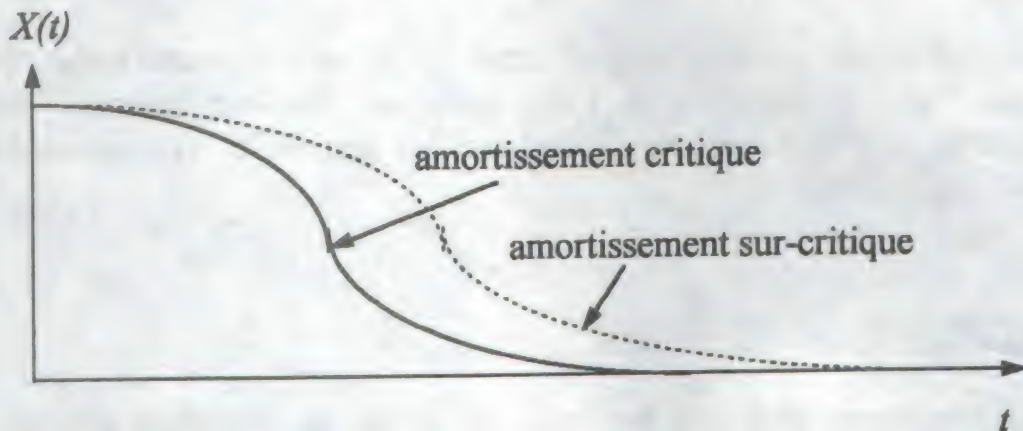
Les mouvements sinusoïdaux élémentaires sont appelés "composantes harmoniques" et leurs fréquences sont des multiples entiers de la fréquence du mouvement fondamental dite fréquence fondamentale ou premier harmonique.

8.4.2. Les vibrations transitoires

Elles sont générées par des forces discontinues (chocs) comme par exemple les vibrations provoquées par un marteau-pilon. Elles peuvent présenter ou non un aspect oscillatoire revenant à une position d'équilibre après amortissement.

Lorsqu'il existe des oscillations, comme pour une structure qui vibre après un choc et pour laquelle le coefficient d'amortissement est faible, on dit qu'il y a amortissement sub-critique, et le mouvement est pseudo-périodique.

Si l'amortissement est très important, la structure revient à sa position d'équilibre sans oscillation, on dit alors que l'amortissement est sur-critique et le mouvement est apériodique.



8.4.3. Les vibrations aléatoires

Elles sont caractérisées par un mouvement oscillant aléatoire qui ne se produit pas identiquement à lui même comme les mouvements périodiques.

Citons un exemple la vibration générée par le phénomène de cavitation sur une pompe centrifuge.

Les vibrations aléatoires ne peuvent être représentées mathématiquement que par une série de relations de probabilités car il faudrait théoriquement un temps infini pour l'analyser, mais on peut considérer que la fonction aléatoire est une fonction périodique dont la périodicité est égale à l'infini et que cette fonction est constituée d'une infinité de fonctions sinusoïdales dont la fréquence varie de façon continue.

Ces vibrations caractéristiques sont donc toutes identifiables et mesurables, et la tendance à l'accroissement de leur intensité est représentative de l'évolution de l'effort qui les génère, et révélatrice du défaut qui se développe.

8.5. Paramètres de vibrations

Les vibrations sont des mouvements et par là répondent aux lois physiques qui régissent les mouvements et dont les trois paramètres fondamentaux sont :

- le déplacement (exprimé en μm) :

$$A(t) = A \sin (\omega t + \varphi)$$

- la vitesse (exprimée en mm/s) :

$$v(t) = d A(t) / dt = \omega A \cdot \sin (\omega t + 90^\circ)$$

- l'accélération (exprimée en m/s^2) :

$$a(t) = d v(t) / dt = d^2 A(t) / dt^2 = - \omega^2 A \cdot \sin \omega t$$

Toutes ces trois grandeurs sont des unités de vibration. Elles sont cependant utilisées dans des cas différents les uns des autres. L'application pratique d'une mesure de déplacement serait par exemple le déplacement d'un arbre par rapport à son support provoqué en général par un balourd, une excentricité d'arbre, une flexion d'arbre, des accouplements défectueux ou d'autres insuffisances dimensionnelles de la machine. Dans ces cas, il s'agit la plupart du temps de signaux à basse fréquence et d'amplitude de 10^{-2} à 10^{-1} mm.

Par contre les vibrations qui apparaissent dans les roulements, paliers, etc, sont dues à des phénomènes d'écoulement de fluides, dans des turbines et turbo-compresseurs, se mesurent dans une large bande de fréquence. Le spectre de ces fréquences s'élève jusqu'au niveau des hautes fréquences sonores. Là, les déplacements mesurés sont très petits (très inférieurs à 10^{-3}) alors que les contraintes qui en résultent sont, cependant, considérables.

C'est pourquoi l'on utilise comme paramètre de vibration dans ces cas soit la vitesse pour n'importe quelle fréquence et surtout entre 2000 et 50000 cycles par minutes. L'accélération va s'employer pour des mesures à hautes fréquences.

8.6. Prise de mesure dans les machines tournantes

Nous précisons ici quelques règles de mesure de vibrations spécifiques aux machines tournantes.

8.6.1. Lieux de fixation des capteurs

Les interfaces de roulements tels que les paliers fluides et roulements à billes sont le lieu privilégié pour la mesure ou l'écoute des vibrations car :

1. c'est par là que transitent les forces alternatives du rotor vers la structure fixe
2. ce sont les organes les plus sensibles à la dégradation

Les capteurs sont fixés au plus près de ces interfaces pour s'affranchir de toute atténuation et dispersion des signaux caractéristiques. Pour des raisons évidentes de commodité, ils sont fixés à l'extérieur et sur des parties fixes soit directement soit mieux par le biais d'un cube d'instrumentation : faces planes et mesures dans trois directions orthogonales.

On mesure non seulement les niveaux mais aussi les phases des vibrations filtrées autour de la fréquence de rotation : soit relativement entre deux points de mesure, soit relativement à un top tour lié au rotor.

8.6.2. Utilisation des vibrations relatives - déplacements

Les efforts dynamiques transitent à travers les éléments fluides des paliers qui, suivant leur conception, ont des mobilités très diverses. Dans les paliers à film d'huile sous pression, la mobilité est essentiellement celle du film d'huile épais (10 à 20 μm) ; elle est élevée ($k = 1 \text{ à } 2 \cdot 10^8 \text{ Nm}^{-1}$) et les déplacements relatifs arbre-cage sont importants : on mesure directement les déplacements par capteur sans contact à courant de Foucault (10 mV/ μm).

La faible dynamique (1/100 ou 40 db), et la bande passante restreinte du capteur limitent le domaine d'analyse spectrale à la fréquence de rotation. Cela convient pour la surveillance des mouvements basse fréquence du rotor des grosses machines tournantes. Les vibrations haute fréquence sont filtrées par la suspension active que constitue le palier fluide.

8.6.3. Mesure des vibrations absolues - accélérations

Dans les roulements à billes, le film d'huile est très mince (0,2 à 1 μm). La mobilité prend en compte non seulement le film d'huile mais aussi la cage et la bague externe du roulement. Les mouvements relatifs arbre-bague externe sont très faibles.

L'emploi d'accéléromètres en montage sur la bague externe s'impose. Leur grande dynamique 1/10.000 ou 80 db), leur bonne sensibilité et leur finesse acceptable palient au fait que les déplacements sont plus faibles. Leur grande bande passante (0 à 10 khz), à condition que leur fixation soit excellente, permet d'accéder aux phénomènes haute fréquence supérieure à 1000 hz :

- les fréquences d'interface (engrènements, encoches) dont les modulations par les cinématiques sont très caractéristiques des défauts mécaniques
- les zones de résonance des cages de roulement qui jouent alors un rôle d'amplificateur des dégâts précoces de roulement

8.7. Représentation du signal vibratoire

Il existe trois formes de représentations du signal vibratoire :

- spectrale ou fréquentielle
- vectorielle
- temporelle

Parmi ces trois formes de représentation du signal, une seule est exploitable : c'est la représentation spectrale.

8.7.1. La représentation spectrale ou fréquentielle

Le spectre qui est le concept fondamental de l'analyse en fréquence. C'est la représentation d'un signal dont l'amplitude ne serait plus donnée en fonction du temps mais en fonction de sa fréquence.

Si l'on décrit mathématiquement un signal sinusoïdal, nous obtenons :

$$A(t) = A \sin (\omega_0 t + \varphi_0)$$

où :

A : amplitude maxi du signal

ω_0 : pulsation en rd/s

φ_0 : phase à l'instant $t = 0$

Sachant que : $\omega_0 = 2 \pi f_0$

$$f = 1 / T = n / 60$$

f : fréquence

T : période

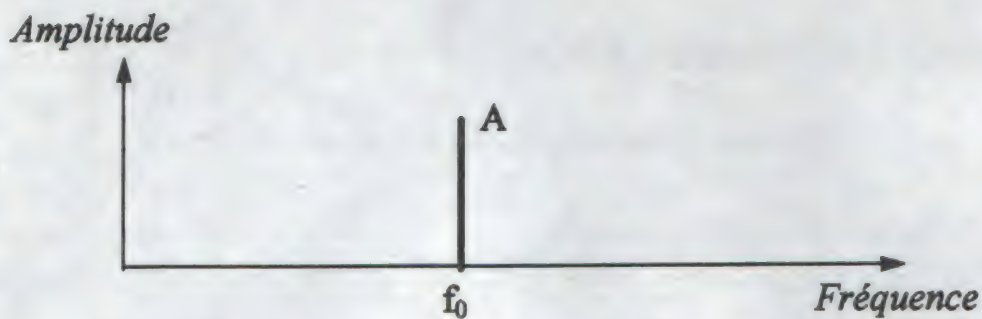
n : nombre de tours par minutes

Pour décrire complètement ce signal, il suffit de connaître :

A : amplitude maxi

f_0 : fréquence du signal

φ_0 : phase

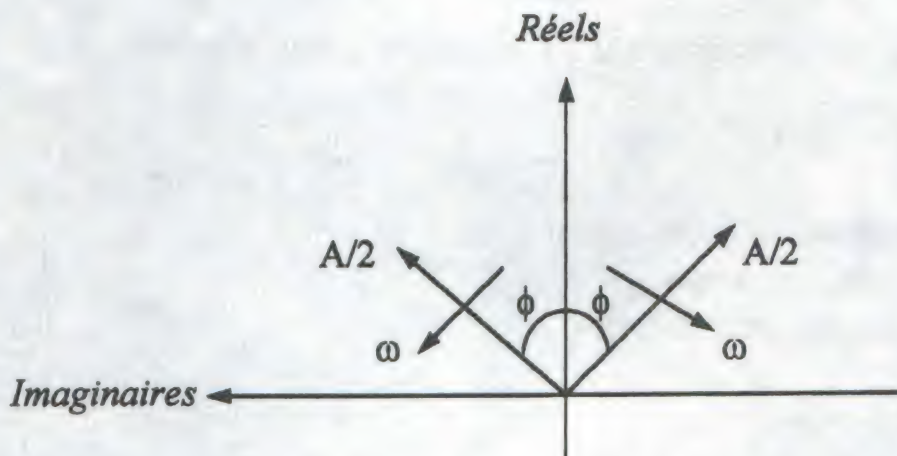


8.7.2. Représentation vectorielle

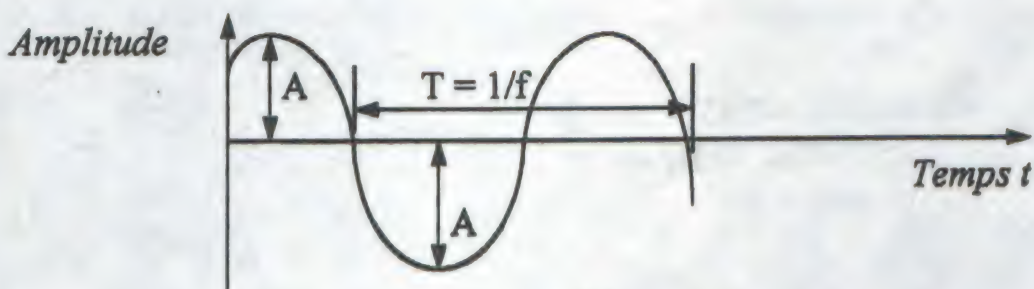
Le signal, toujours en réel, est la somme vectorielle de deux vecteurs imaginaires tournant en sens inverses à la fréquence f_0 et d'amplitude $A_0/2$.

A chaque instant t , les parties imaginaires des deux vecteurs s'annulent. Les deux parties réelles s'additionnent et valent ensemble :

$$2 A_0/2 \cos (\omega_0 t + \phi_0)$$



8.7.3. Représentation temporelle



Les vibrations périodiques, transitoires ou aléatoires, pouvaient toutes être décrites mathématiquement comme une succession de fonctions sinusoïdales.

Le signal $A(t)$ produit par ces vibrations peut donc être considéré comme la somme des amplitudes de chaque sinusoïde composante :

$$A(t) = A_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0) + A_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + \dots + A_n \sin(\omega_n t + \varphi_n)$$

On s'aperçoit ainsi que ce signal devient vite inextricable pour un grand nombre de composantes (A_1, A_2, \dots) en représentation temporelle ou vectorielle, alors que, seul, le spectre en fréquence reste simple et exploitable. C'est pourquoi, on étudie généralement les variations d'amplitude d'un signal en représentation fréquentielle plutôt qu'en représentation temporelle ou vectorielle.

8.8. Méthodes d'étude des vibrations

Dans un service maintenance, il convient d'éviter soit des mesures non significatives donc inutilisables en terme de prévision soit, à l'opposé, des analyses trop complexes donc superflux et trop coûteuses en matériel, en homme, en temps. Une démarche optimale de détection préventive des défauts doit répondre aux critères suivants :

- détecter et valider la majorité des défauts aussitôt que possible
- conduire au minimum de fausses détections de défauts
- donner et conserver suffisamment d'informations sur le défaut pour se laisser la possibilité d'une analyse ultérieure plus complexe et plus validante

Nous identifions et classons les techniques de maintenance par mesure de vibrations suivant le matériel et les analyses mis en jeu. Les interférences sont en fait nombreuses et très souvent les différentes techniques se côtoient et se complètent.

Une onde vibratoire peut être étudiée par plusieurs méthodes qui correspondent à des niveaux différents de connaissance du phénomène et à l'utilisation de matériels d'analyse plus ou moins sophistiqués :

- mesure de la valeur globale
- technique de résonance
- analyse spectrale
- techniques spécifiques : cepstre, détection d'enveloppe, autres

8.8.1. Mesure de la valeur globale

On identifie l'état vibratoire de la machine dans sa globalité par une seule valeur ou niveau , généralement l'accélération ou la vitesse efficace. On suit l'évolution de ce niveau par plages de fréquences ou toutes fréquences confondues.

C'est une méthode rapide, peu onéreuse mais approximative qui permet tout au plus de trier dans un parc de machines celles qu'il va falloir surveiller plus étroitement par des analyses spectrales.

Elle consiste en l'analyse du signal qui abstraction du paramètre fréquentiel pour ne mesurer que l'amplitude évaluée de différentes façons :

- en valeur crête à crête : c'est à dire en mesurant l'amplitude maximum de l'onde fondamentale, mesure utile par exemple lorsque le déplacement vibratoire d'une machine est critique en regard des contraintes de charge maximale ou de jeu mécanique
- en valeur crête : mesure intéressante pour indiquer par exemple le niveau d'un choc de courte durée
- en valeur efficace : mesure qui tient compte de l'évaluation de la valeur des composantes harmoniques et directement reliée au contenu énergétique de la vibration

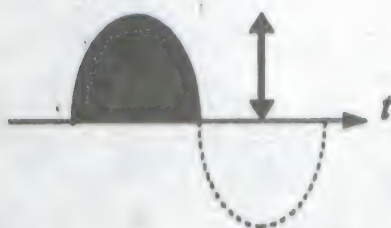
A noter que ces valeurs d'amplitudes d'utilité complémentaire peuvent représenter un déplacement, une vitesse ou une accélération, car vitesse et

accélération sont aussi des fonctions sinusoïdales obtenues après dérivation de la fonction déplacement.

Dans la pratique, le spectre ou signal vibratoire est généralement complexe, composé de plusieurs signaux sinusoïdaux de fréquences et d'amplitudes différentes, contenant chacun des informations différentes, mais propres à des phénomènes définis.

Les signaux vibratoires complexes peuvent être employés en représentation temporelle telsquels pour les besoins de l'analyse alors que pour les besoins de la surveillance, l'indication, l'enregistrement, la surveillance de seuil, il y a lieu de les convertir en signaux continus par redressement du signal. Examinons maintenant les possibilités d'évaluation d'un signal de vibration redressé.

La première définition importante pour l'appréciation de phénomènes dynamiques est l'évaluation des amplitudes simples ou des amplitudes doubles.



Amplitude simple

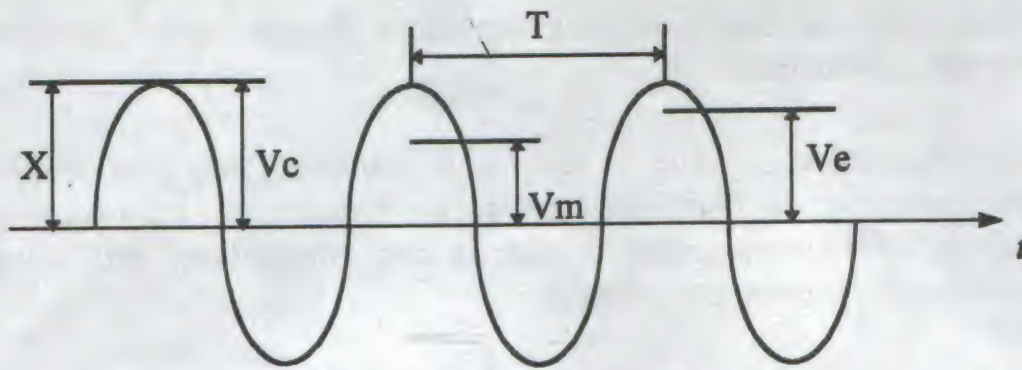


Amplitude double

En règle général, l'accélération et la vitesse de déplacement sont évaluées en amplitude simple alors que le déplacement s'exprime en amplitude double.

Le deuxième critère se rapporte à la définition de l'amplitude du signal redressé par rapport à celle du signal brut. Cette grandeur peut être exprimée en :

- valeur crête : $V_c = X$
- valeur moyenne : $V_m = 0,637 \cdot X$
- valeur efficace : $V_e = 0.707 \cdot X$



Ainsi dans les cas des paramètres déplacement, vitesse et accélération d'un mouvement sinusoïdal, la valeur crête est de :

- déplacement : $V_c = 2 X$, exprimée en μm
- vitesse : $V_c = X$, exprimée en mm/sec
- accélération : $V_c = X$, exprimée en mm/sec^2

$$V_m = 1 / T \int_0^T X(t) dt$$

$$V_e = \sqrt{1 / T \int_0^T X(t)^2 dt}$$

Toutes ces grandeurs peuvent se rapporter à l'appréciation par amplitude simple ou double.

Une question souvent controversée est celle de la détermination des seuils de vibrations admissibles en exploitation. Pendant de nombreuses années et encore maintenant, le suivi vibratoire a été fait en comparant les niveaux de vitesse efficace soit à des mesures préalables, soit à des standards.

Les normes expriment les valeurs limites ou seuils de l'intensité vibratoire d'une machine et donnent des valeurs efficaces pour la vitesse de vibration des différents types de machines ou support, telles que les normes :

- la norme allemande : VDI 2056
- la norme internationale : ISO 2372 ou 3945
- la norme anglaise : BS 4675
- La norme française : AFNOR E90-300

Ces standards sont basés sur le fait que des machines similaires et de même taille doivent avoir la même énergie vibratoire donc le même niveau vitesse efficace entre 10 et 1000 Hz.

Une surveillance basée sur de tels critères détectera de façon indifférenciée balourd, désalignement, certains défauts électriques à un stade déjà avancé sans pour cela les distinguer ni les identifier.

Critères vibratoires de sécurité			Valeur Efficace de la vitesse	
selon les normes	ISO 2372 VDI 2056	NF E 90-300 et BS 4675	en mm/s	en db
Arrêt	Arrêt	Arrêt	45	153
			28	149
			18	145
			11,2	141
	A peine tolérable	A peine tolérable	7,1	137
			4,5	133
A peine tolérable	Acceptable	Acceptable	2,8	129
			1,8	125
Acceptable	Bon jusqu'à 300 KW si fondations spéciales	Bon fréquence de vibration supérieure à celle de rotation	1,12	121
Bon petites machines			0,71	117
			0,45	119
			0,28	109
	0,16	105		
Groupe K	Groupe M	Groupe G		
< 15 KW	15 à 75 KW	> 75 KW		

Ceci peut être dangereux dans l'établissement de seuils d'intervention car ces seuils doivent être différents selon qu'il s'agit d'un problème de balourd, d'un défaut de roulement ou encore d'une mauvaise lubrification.

Cependant les normes présentent un intérêt incontestable pour la réception d'une machine neuve. Pour les machines en service, concernant l'incidence de la fonction de transfert ou caractéristique de la structure, il sera plus judicieux de faire des comparaisons avec des valeurs relevées lorsque le matériel était neuf. Ici interviendra l'appréciation du responsable entretien qui fixera les seuils d'alarme en fonction de l'expérience qu'il aura acquise concernant ce type de matériel.

8.8.2. Technique de résonance

Définissons d'abord le terme résonance : Il y a résonance lorsque le signal de sortie d'un système est fortement amplifié par rapport au signal d'entrée pour une fréquence particulière appelée fréquence propre du système.

La techniques de résonance représente une méthode utilisée pour le dépistage spécifique des défauts de roulements. Les fréquences engendrées au-delà de 20.000 Hz sont des fréquences dues principalement, sur une machine tournante, à un défaut de roulement ou d'engrenage, à l'exclusion des défauts de balourd, désalignement, problèmes électriques, forces hydrauliques et aérodynamiques.

La méthodes de mesure par technique de résonance est donc basée sur l'utilisation d'un filtre éliminant les fréquences inférieures à 20.000 Hz et d'un capteur de vibrations dont la fréquence propre ou résonance est de l'ordre de 30.000 Hz et dont on mesure l'excitation ou pointe d'énergie ou onde de choc.

La mesure de l'évolution de cette onde de choc, caractéristique des paliers défectueux permet de suivre avec précision l'état d'un roulement sans se préoccuper de la complexité de la machine.

Cette mesure d'ondes de chocs ou pointes d'énergie permet une sélection rapide entre bons roulements et roulements endommagés. On

mesure les impulsions ultrasoniques provoquées par les impacts entre les divers éléments du roulement sur lesquels se développe des défauts microscopiques et on établit le diagnostic en fonction de tables de sévérité ou en fonction de l'analyse de la tendance du défaut par comparaison successives.

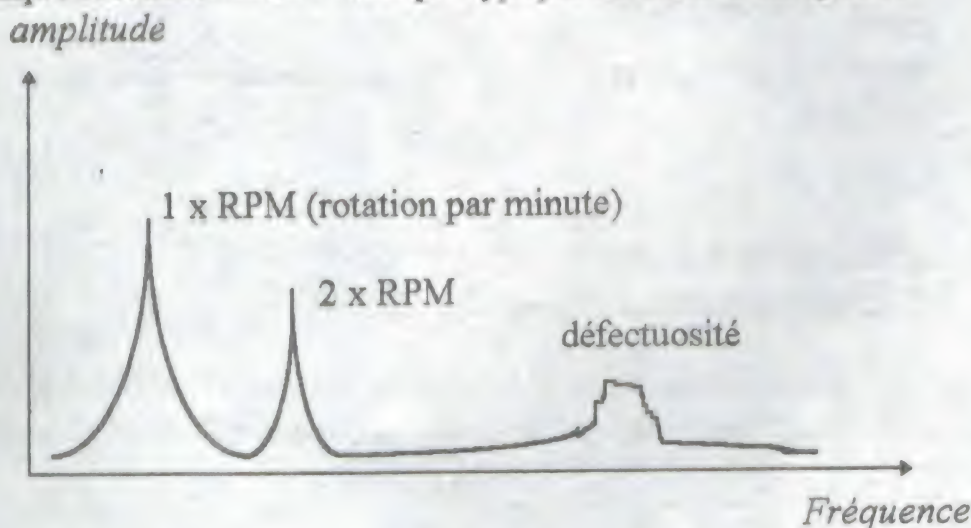
A noter que cette technique est valable pour des machines relativement calmes comme des moteurs électriques, mais plus aléatoire pour des pompes car elles ont des turbulences à hautes fréquences et des cavitations, ou pour des boîtes de vitesses complexes dont les harmoniques d'engrènement sont à haute fréquence.

8.8.3. Analyse spectrale

C'est une méthode d'investigation par analyse en fréquence. Dans la plupart des mesures de vibrations, il est beaucoup plus aisé de travailler dans le domaine des fréquences que dans le domaine des temps.

De ce fait est née l'idée de l'analyse en fréquence ou spectrale où le signal amplitude/temps est converti en signal amplitude/fréquence. Le but de cette analyse est de ressortir du signal complexe les différentes composantes sinusoïdales.

Le spectre, outil de cette analyse, se présente sous forme d'un graphique montrant l'amplitude de la vibration à chaque fréquence. Le graphique suivant illustre l'exemple typique du tracé d'un spectre.



Dans un spectre toutes les composantes du signal vibratoire sont représentées sous forme de pics et l'on peut suivre individuellement une variation d'amplitude sans qu'il y ait, comme dans la mesure globale, l'effet de masque qui risque d'estomper la mise en évidence d'un défaut en développement.

A noter que les unités de fréquence les plus utilisées sont :

- le RPM ou nombre de rotations par minute
- le CPM ou nombre de cycles par minute
- le hertz (Hz) ou nombre de cycles par seconde :

$$1 \text{ Hz} = 60 \text{ CPM} = 60 \text{ RPM}$$

Cette analyse est plus riche et plus fine. Un spectre, en effet, permet de déterminer non seulement l'importance de l'anomalie mais aussi sa nature (balourd, lignage, roulements, engrenages, ...). Le diagnostic ainsi rendu possible permet de définir la cause et l'urgence de l'intervention à effectuer.

Détection par l'analyse spectrale des principales anomalies

Les anomalies spectrales peuvent être classées en trois catégories :

- pics apparaissant à des fréquences multiples ou sous multiples de la vitesse de rotation
- pics apparaissant à des vitesses indépendantes de la vitesse du rotore
- densité spectrale provenant de composantes aléatoires de la vibration

8.8.3.1. Phénomènes provoquant des pics dont les fréquences sont liées à celle du rotor

Ce sont principalement les phénomènes de balourd, de désalignement, de mauvais serrage mécanique, d'avaries d'engrenage, de tourbillonnement

de film d'huile, d'excitation hydrodynamique, de mauvais état d'une courroie de transmission, ...

Phénomène de balourd

C'est la cause de vibration la plus commune et la plus fréquemment rencontrée. En dépit du soin apporté à la construction des rotors, il est impossible de les équilibrer parfaitement et il existe donc toujours une vibration à la fréquence de rotation dont l'amplitude est directement proportionnelle à l'importance du balourd et au carré de la vitesse de rotation.

Une modification brusque de l'amplitude correspond systématiquement à une modification du balourd dont l'origine peut être une rupture ou la déformation d'une partie du rotor (ailettes de turbine par exemple). Si cette modification d'amplitude est plus lente, il peut s'agir d'une usure ou d'un encrassement de la partie tournante (suie, d'épôt, etc.).

Le déséquilibre dynamique est généralement une combinaison de deux types de balourds. Il se caractérise par un niveau vibratoire :

- radial important à la fréquence de rotation
- axial faible

Désalignement

Un désalignement provoque des vibrations à la fréquence de rotation ainsi qu'aux harmoniques d'ordre 2, 3 et parfois 4, c'est à dire double, triple ou quadruple de la fréquence de rotation et parfois même davantage en particulier pour les accouplements à denture où l'on rencontre les harmoniques liés au nombre de dents et à la fréquence de rotation. La composante axiale de la vibration est particulièrement importante pour l'harmonique d'ordre 2. Un défaut d'alignement se traduit par des niveaux :

- axiaux très élevés à deux fois la fréquence de rotation
- radiaux élevés à deux fois la fréquence de rotation

Mauvais serrage mécanique

Lorsqu'un palier est desséré ou présente une possibilité de mouvement partiel dans le plan radial, il apparaît une vibration radiale à une fréquence radiale égale à deux fois la vitesse de rotation. Cette vibration se traduit sous l'effet de balourd initial et elle peut prendre une amplitude élevée en fonction du degré de desserage du palier.

Une analyse du déphasage entre deux mesures prises orthogonalement sur un même palier permet de différencier une anomalie due à un balourd (force tournante), d'un défaut de serrage ou d'une déformation du support (force directionnelle due à la contrainte).

Avarie d'engrenage

dans le phénomène d'engrènement, il se produit un choc chaque fois qu'une dent menante est en contact avec une dent menée. Ceci génère une vibration dont la fréquence est égale à la vitesse de rotation du pignon multiplié par son nombre de dents.

S'il y a déformation du profil de la denture, la fluctuation de la charge sur les dents donne naissance à des fluctuations de vitesse et aboutit ainsi à une modulation de fréquence ou de phase. L'analyse spectrale de ce phénomène montre des bandes latérales situées de part et d'autre de la fréquence d'engrènement.

L'analyse du cepstre, que nous verrons plus loin, peut aider à l'identification de ces bandes latérales dont l'amplitude et l'étendue sont révélatrices du défaut d'engrènement.

Tourbillonnement de film d'huile

ce phénomène apparaît sur les paliers lisses faiblement chargés, lubrifiés en graissage hydrodynamique. Il se produit légèrement en dessous de la moitié de la fréquence de rotation de l'arbre (de 0,42 à 0,48 fois la fréquence suivant les caractéristiques du palier).

Ceci, associé à un balourd du rotor et à une fréquence de résonance voisine de la vitesse de rotation, conduit au phénomène de fouettement du rotor.

Excitation hydrodynamique

Les variations de pression engendrées par les ailettes d'une turbine passant devant des ailettes fixes vont créer des vibrations dont la fréquence sera égale à la vitesse de rotation multipliée par le nombre d'ailettes tournantes et le nombre d'ailettes fixes.

Courroie de transmission en mauvais état

Le mauvais état d'une courroie en "V" par variation de largeur ou déformation, crée des variations de tension susceptibles d'induire des vibrations de fréquence égale à celle de la rotation de la courroie. Si les poulies ne sont pas bien alignées, il y aura une composante axiale importante à cette fréquence.

8.8.3.2. Phénomènes provoquant des pics à des fréquences non liées à celle du rotor

Vibrations de machines voisines

Le sol et les socles de fixation peuvent transmettre des vibrations d'une machine à l'autre. Si l'on arrête la machine voisine mise en cause, le pic spectral disparaît.

Vibrations d'origine électrique

Les vibrations des parties métalliques du stator et du rotor sous l'excitation électrique de champs électromagnétiques produisent des pics à des fréquences égales à celle du secteur et ses harmoniques.

L'augmentation de ces pics peut être le signe de la dégradation du moteur comme par exemple la variation de l'entrefer.

Ces pics disparaissent bien évidemment avec la coupure du courant.

A noter que les fréquences de courant à 50Hz ou son harmonique à 100 Hz peuvent être confondues avec une anomalie de balourd ou de désalignement sur un moteur tournant à 1500 tr/min ou 3000 tr/min. Seuls des analyseurs précis permettent de dissocier ces deux phénomènes.

Résonance de la structure ou du rotor

Chaque sous ensemble de la machine possède une fréquence propre de résonance qui est fonction de paramètres multiples tels que la rigidité, la masse, la forme géométrique, ...

Si une excitation quelconque possède une fréquence voisine de celle de la résonance, un pic apparaît dans le spectre.

Les machines sont toujours conçues pour que ces fréquences de résonance ne se rencontrent que dans les régimes transitoires et non au régime de fonctionnement.

8.8.3.3. Phénomène créant des modifications des composantes aléatoires du spectre

Cavitation

Ce phénomène hydrodynamique induit des vibrations aléatoires qu'il faut pouvoir reconnaître pour les éliminer en modifiant les caractéristiques d'aspiration de la pompe. Il se reconnaît également par un bruit caractéristique.

Ecaillage des roulements

L'écaillage d'une piste de roulements provoque des chocs et une résonance du palier qu'il est facile d'identifier avec un appareil de mesure d'ondes de chocs.

En analyse spectrale, ce phénomène apparaît aux hautes fréquences par une densité spectrale qui augmente au fur et à mesure que les roulements se détériorent, et sous forme de "bosses" qu'il est possible d'analyser notamment avec les techniques de détection d'enveloppe que nous verrons par la suite.

Frottements

Le frottement de surfaces comportant des apérités génère des vibrations d'une fréquence généralement élevée. L'état de surface et la nature des matériaux en contact a une influence sur l'intensité et la fréquence des vibrations ainsi créées.

8.8.3.4. Tableau de reconnaissance des principales anomalies

Cause	V i b r a t i o n		Remarques
	Fréquence	Direction	
Tourbillon d'huile	de 0,42 à 0,48x FR	Radiale	Uniquement sur paliers lisse hydrodynamiques à grande vitesse
Balourd	1 x FR	Radiale	Intensité proportionnelle à la vitesse de rotation. Déphasage de 90° sur 2 mesures orthogonales
Défaut de fixation	1, 2, 3, 4 x FR	Radiale	Aucun déphasage sur 2 mesures orthogonales
Défaut d'alignement	2 x FR	Axiale et radiale	Vibration axiale plus importante si le défaut d'alignement comporte un écart angulaire
Excitation électrique	1, 2, 3, 4 x 50Hz	Axiale et radiale	Disparaît dès coupure de l'alimentation

Cause	V i b r a t i o n		Remarques
	Fréquence	Direction	
Vitesse critique de rotation	Fréquence critique du rotor	Axiale et radiale	Apparît en régime transitoire et s'atténue ensuite
Courroie en mauvais état	1, 2, 3, 4 x FP	Radiale	
Engenages endommagés	FE =Ndents x FR arbre	Radiale et axiale	Bandes latérales autour de la fréquence d'engrènement. Aide possible par analyse du cepstre
Excitation hydrodynamique	Fréquence de passage des aubes	Radiale et axiale	
Détérioration de roulement	Hautes fréquences	Radiale et axiale	Ondes de chocs dues aux écaillages. Aide possible par détection d'enveloppe

Légende :

- FR : Fréquence de Rotation
- FE : Fréquence d'engrènement
- FP : Fréquence de passage de la courroie

8.8.4. Techniques spécifiques

Certains phénomènes de vibrations sont sporadiques et donc difficiles à analyser et à surveiller, d'où la nécessité de faire appel à une aide à l'analyse spectrale. C'est pourquoi, dans certaines applications, il est utile d'avoir une représentation différente du spectre par des techniques spécifiques.

Il s'agit de méthodes complémentaires de l'analyse spectrale et comme telles mises en œuvre sur des analyseurs de spectres haute résolution. Nous préférons, ainsi les individualiser car elles opèrent, comme la connaissance approfondie des machines, à un niveau ultérieur dans le diagnostic vibratoire.

8.8.4.1. Le cepstre

Le cepstre est une technique permettant d'identifier et de quantifier dans un spectre toute famille de composantes périodiques, qu'elles soient sous forme de peignes, de raies (chocs) ou de bandes latérales de modulations centrées autour d'une fréquence caractéristique et de ses harmoniques (engrènement, encoche, fréquence de pales, fréquence de roulements, ...).

Cette technique d'investigation est particulièrement intéressante pour le diagnostic des engrènements et permet, par exemple de suivre dans le temps les défauts de dentures, l'usure d'une clavette, la déformation des arbres, le jeu, ...

C'est une technique idéale pour l'aide au diagnostic des chocs répétitifs sur machines à cinématique complexe (réducteurs, boîte de vitesse, compresseur à vis,...).

8.8.4.2. L'analyse de l'enveloppe

Elle met en évidence une série d'impulsions marquées par un bruit de fond et mieux définies dans le domaine temporel que dans celui des fréquences. Ce type d'analyse est utilisé notamment pour détecter des défauts naissants sur roulement et engrenages. C'est une technique très performante qui permet de détecter et localiser les défauts précoces et de les diagnostiquer correctement avec les meilleurs chances de succès.

Les analyses classiques des signaux vibratoires, y compris l'analyse spectrale y compris l'analyse spectrale haute résolution, ne donne pas toujours des résultats exploitables : ceci est dû au fait que les défauts naissants des roulements produisent des niveaux vibratoires faibles qui sont souvent masqués par d'autres défauts de la machine comme ceux d'engrènement ou d'encoches.

La détection d'enveloppe permet d'analyser très finement une partie quelconque du spectre. On l'utilise autour des maximums étalés à haute fréquence associés aux résonances mécaniques d'éléments du roulement :

ainsi des défauts naissants non détectables par les analyses classiques sont amplifiés.

On procède à un filtrage passe bande de la zone intéressante du spectre puis à un redressement du signal par suppression du celui porteur (amplifié lui aussi) pour en détecter l'enveloppe. Une analyse spectrale basse fréquence (0 à 250 Hz) de l'enveloppe du signal vibratoire émis par le roulement défectueux présentera une série de raies dont la fréquence fondamentale sera une des fréquences caractéristiques du roulement, localisant à coup sûr le défaut.

Le principe de la détection d'enveloppe se résume selon la procédure ou étapes suivantes :

- spectre vibratoire
- filtrage passe bande de la zone intéressante du spectre
- redresseur pour supprimer le signal porteur amplifié
- détection d'enveloppe
- filtrage passe bas de l'enveloppe du signal
- analyse spectrale
- mesures des pics

8.8.4.3. Autres techniques

Parmi les techniques spécifiques, il existe encore des représentations plus complexes mettant en évidence 'd'autres paramètres, citons :

1. l'analyse dite synchro qui s'avère utile, par exemple en faisant la moyenne d'enregistrements de durée égale à un tour de pignon, pour éliminer les phénomènes relatifs à l'arbre de la roue menée et pour faire ressortir les phénomènes concernant la denture du pignon.
2. les variations de phases qui peuvent être aussi très riches en enseignements pour distinguer entre balourd statique et balourd dynamique, entre balourd et contrainte de serrage, ...
3. l'analyse spectrale des courants induits sur appareils électriques inaccessibles (pompes immergées, nucléaire, ...)

8.9. Chaîne de mesure, matériel

La chaîne de mesure doit remplir les fonctions suivantes :

- transformer la vibration mécanique en signal électrique : c'est le rôle du capteur muni ou non d'un préamplificateur ou non du signal
- transmettre le signal ou le mettre en mémoire : c'est le rôle des appareils d'enregistrements analogiques ou des appareils de numérisation du signal
- analyser le signal : c'est le rôle de l'analyseur

8.9.1. Les capteurs

Selon la gamme des fréquences étudiées, ils doivent mesurer soit le déplacement, soit la vitesse ou l'accélération.

Il existe des capteurs spécifiques à chacun de ces paramètres mais l'accéléromètre ou capteur d'accélération est le type de sonde le plus utilisé en raison de sa large gamme de fréquence d'utilisation (il peut mesurer un déplacement ou une vitesse) et de ses faibles dimensions.

Les capteurs placés en un point d'une machine ne captent pas directement les efforts appliqués, mais l'image de ces efforts transmis par la machine, la masse et la rigidité de celle-ci jouant un rôle correcteur.

Le coefficient de correction entre l'effort appliqué et la mesure captée constitue la fonction de transfert de la machine et a une valeur égale à :

Fonction de transfert = signal capté / signal émis

8.9.2. Les enregistreurs

Les informations sont collectées soit :

- sur magnétophones portatifs qui conservent le signal en analogique et permettent, pour certains d'entre eux, de prendre la mesure de plusieurs points simultanément et d'étudier le déphasage révélateur de nombreux défauts
- sur des appareils à enregistrement numérique qui sont souvent d'un encombrement plus faible et qui permettent la programmation de la tournée d'inspection

8.9.3. Les analyseurs

8.9.3.1. Appareils de mesure globale

Lorsqu'on effectue une mesure globale, la fonction de l'analyseur est assez sommaire. En effet, il se borne, dans ce cas, à donner une valeur crête ou une valeur efficace de l'amplitude du signal mesuré.

8.9.3.2. Appareils à filtre accordable

Le filtrage est une méthode d'analyse d'un signal vibratoire qui permet d'examiner les composantes de celui-ci sur une partie de la fréquence seulement grâce à l'utilisation d'un filtre qui élimine les fréquences indésirables.

Ce type d'appareil donne des mesures filtrées sur une gamme de fréquence choisie. De ce fait, on peut avoir une idée approximative de la forme du spectre. Pour déterminer la durée d'exploitation de la gamme complète des fréquences, on utilise des filtres passe-bande à pourcentage constant plutôt que les filtre à largeur constante.

Filtre à pourcentage constant

Sa largeur est proportionnelle à la fréquence moyenne d'accord. Un filtre de 4 % aura par exemple une largeur de bande passante de 4 Hz pour une fréquence centrale de 100 Hz et de 40 Hz pour une fréquence centrale de 1000 Hz.

Ce type de filtre permet de scruter beaucoup plus rapidement les hautes fréquences, mais ne permet pas, généralement de déceler les bandes latérales significatives des défauts d'engrènement, du fait de la largeur de bande trop importante.

Filtre à largeur de bande constante

Ce type de filtre comme son nom l'indique possède une largeur de bande constante. Il présente l'inconvénient de nécessiter beaucoup de temps pour couvrir les hautes fréquences.

8.9.3.3. Analyseurs du spectre en temps réel

L'analyseur de spectre en temps réel convertit les données temporelles en données fréquentielles et permet de voir tous les changements intervenus dans le domaine des fréquences. Il effectue donc automatiquement la transformation de Fourier soit par un système analogique soit par un système digital.

Actuellement, les analyseurs de spectre sont construits autour d'un microprocesseur utilisant l'algorithme dit FFT (Fast Fourier Transformation) pour lequel il est nécessaire de numériser le signal. Ce sont donc des analyseurs digitaux.

Le FFT est un algorithme de transformation rapide du signal d'entrée en signal exploitable par l'ordinateur.

Le signal est numérisé dès la prise d'informations et un écran de faible dimensions permet de voir l'allure générale du spectre. Ces appareils de précision suffisante pour la détection des défauts les plus courants, peuvent mettre en mémoire un certain nombre de mesures qu'ils restitueront ensuite à un ordinateur pour traitement et archivage. Une analyse plus précise de spectre peut alors être effectuée ainsi que des comparaisons avec les spectres précédents.

9. LA LUBRIFICATION

9.1. Généralités sur la protection contre l'usure adhésive

Maîtriser la grandeur et l'effet du coefficient de frottement sur le comportement des pièces en contact entraînera une protection contre l'usure adhésive générée de ce contact. Il existe trois plages du coefficient de frottement :

- de glissement de l'ordre de 0,1 à 1
- de roulement de l'ordre de 0,001 à 0,01
- fluide de l'ordre 10^{-3}

Le frottement en régime sec admet que l'usure croît en général avec le coefficient de frottement.

Cependant les lubrifiants eux même peuvent être agressifs. En régime lubrifié, il ne faut pas perdre de vue qu'une faible augmentation de température peut se traduire par une forte augmentation de l'oxydation des huiles et donc de l'acidité.

On peut ainsi, pour une faible augmentation du coefficient de frottement, de 0,05 à 0,08, subir une augmentation de 15°C et se trouver dans un domaine d'oxydation catastrophique.

L'agressivité des lubrifiants peut se manifester par la présence des additifs ou celle de l'eau. Cette dernière produit une fragilisation par l'hydrogène en fond de fissure. Dans ce cas, il faut la neutraliser ou empêcher l'introduction de l'eau par l'utilisation d'hydrofuges, de dispersants, de complexants, de neutralisants ou autres produits.

L'interaction et l'interdépendance de tous ces facteurs nécessitent des choix judicieux dans la conception des mécanismes d'équipements pour prévoir au mieux les conditions les plus stables dans le fonctionnement et pouvoir répondre aux exigences et impératifs de la production par des temps de fonctionnement relativement fiables.

9.1.1. Conception technologique

La conception technologique et géométrique diminuant les échauffements interfaciaux consiste à veiller sur les concepts technologiques suivants :

- choix des matériaux
- réduction des pressions de contact et de la vitesse
- refroidissement convenable des surfaces par :
 - * choix des matériaux thermoconducteurs
 - * choix des pièces favorisant la dissipation de calories
 - * emploi d'un fluide réfrigérant qui peut être le lubrifiant

9.1.2. Interposition du film lubrifiant

La deuxième possibilité de protéger les deux antagonistes contre l'usure adhésive est l'interposition entre les deux surfaces d'un film lubrifiant ou autolubrifiant à faible résistance au cisaillement. Ce film peut être :

- un métal mou (Pb, Sn, In, Cu) déposé en très faible épaisseur sur un substrat très dur (coussinets minces).
- sels métalliques autolubrifiants tels que les sulfures, les chlorures, les phosphates apportés soit par traitement de surface (sulfinisation) soit par formation in situ, par action d'additifs extrême pression incorporés dans le lubrifiant (additifs soufrés, chlorés et phosphorés essentiellement)
- composés possédant une structure favorable, se cisailant facilement par clivage tels que graphite, bisulfure de Molybdène (MoS_2)
- film d'huile suffisamment résistant pour prévenir les contacts métal-métal :
 - * en régime hydrodynamique, la protection est liée à l'épaisseur du film
 - * en régime mixte, la protection peut être assurée par :
 - * un film moléculaire constitué d'agents organiques d'onctuosité polaire : amines, aciers gras, esters, savons lorsque les températures de surfaces sont modérées et ne dépassant pas les 150 à 200°C

- * les additifs anti-usure pour les températures plus élevées. En particulier, le dithiophosphate de zinc (DTPZ) agit à la fois par sa polarité (physisorption) et au delà de sa température de décomposition par sa réactivité chimique vis-à-vis des surfaces métalliques (chimisorption) produisant des composés protecteurs de sulfures et phosphates métalliques, mais moins rapidement que les additifs extrême pression

9.2. La lubrification

Elle a pour objectif d'interposer une couche d'huile dite "film d'huile" entre les corps en contact afin d'éviter l'usure des éléments au niveau du contact métallique.

Le lubrifiant assure une protection contre :

- l'oxydation
- la pollution extérieure
- le refroidissement
- l'évacuation des corps étrangers

La durée de vie des pièces en contact est directement liée à l'efficacité du film d'huile qui dépend de :

- la nature du lubrifiant et donc de ses capacités à tenir en température, vitesse de frottement, ...
- la charge appliquée aux pièces et la nature des matériaux

9.3. Lubrification à l'huile

10.3.1. Choix de la lubrification à l'huile

L'huile est généralement employée lorsque :

- Les pièces à lubrifier sont intégrées dans un mécanisme déjà lubrifié à l'huile (réducteur, boîte à vitesse)

- Les pièces peuvent bénéficier d'un système de graissage centralisé où l'huile est utilisée aussi comme réfrigérant

Ce choix présente les avantages et inconvénients suivants :

Avantages

- bonne pénétration du lubrifiant
- bonne stabilité physico-chimique
- aptitude au refroidissement
- évacuation des corps étrangers
- contrôle aisé du lubrifiant par état de niveau

Inconvénients

- étanchéité nécessaire du montage
- en cas d'arrêt prolongé, mauvaise protection contre l'oxydation et l'humidité
- retard au démarrage lorsqu'une mise en circulation autonome préalable à la rotation est nécessaire

9.3.2. La viscosité

C'est la caractéristique principale d'une huile. On distingue la viscosité :

- dynamique (μ) exprimée en Poiseuilles
- cinématique (σ) exprimée en :
 - * m^2/s , soit : $\sigma = \mu / \text{masse volumique}$
 - * ou en Stokes : $1 \text{ St} = 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$

Exemple : l'eau à 20°C possède une viscosité de 1 Centistoks (1 cSt).

Une autre caractéristique importante de l'huile qui n'est pas quantifiable, c'est l'onctuosité. Elle caractérise l'aptitude du lubrifiant à former un film sur les surfaces solides.

Le choix de la viscosité est très important pour l'efficacité de la lubrification. Il peut être fait à l'aide de diagrammes préétablis tirés de la théorie élasto-hydrodynamique (EHD).

9.3.3. Pouvoir séparateur du lubrifiant

Dans la zone de contact entre les corps, la théorie de Hertz permet d'analyser les déformations élastiques résultant des pressions de contact qui peuvent atteindre des valeurs très élevées.

Malgré ces grandes pressions, il est possible de créer sous certaines conditions un film d'huile séparant les surfaces en contact dont on peut estimer l'épaisseur (h).

On caractérise alors le régime de lubrification par la valeur relative de l'épaisseur (h) du film d'huile par rapport à la rugosité des surfaces en contact.

On prend généralement le rapport h/r où r est appelé "la rugosité équivalente des surfaces en contact définie par la formule :

$$r = \sqrt{r_1^2 + r_2^2}$$

où :

- * r_1 : est la rugosité moyenne du corps 1
- * r_2 : est la rugosité moyenne du corps 2

9.3.4. Théorie élasto-hydrodynamique : EHD

La théorie EHD prend en compte tous les paramètres qui entrent dans le calcul des déformations élastiques de l'acier et des pressions

hydrodynamiques du lubrifiant et permet une évaluation de l'épaisseur du film d'huile. Ces paramètres sont les suivants :

- nature du lubrifiant définie par la viscosité dynamique de l'huile à la température de fonctionnement et son coefficient piézo-visqueux qui caractérise l'augmentation de sa viscosité en fonction de la pression de contact
- nature des matériaux en contact définie par leur module d'élasticité et leur coefficient de pression, lesquels caractérisent l'amplitude des déformations au niveau des contacts sous charges
- la charge sur le corps roulant le plus sollicité
- la vitesse
- la forme des surfaces en contact définie par leurs rayons de courbure principaux lesquels caractérisent le type de guidage ou roulement utilisé

La théorie EHD indique que l'épaisseur du film augmente quand :

- la viscosité dynamique augmente
- la vitesse augmente
- la charge par unité de largeur de contact diminue

On peut dire que l'usure baisse quand la viscosité et la vitesse augmentent, mais en réalité il est souhaitable de fonctionner au régime correspondant au décollement des deux surfaces en contact, voir même un peu au dessus. En dessous de ce point, on se trouve en régime mixte.

En régime élastohydrodynamique, il faut augmenter l'épaisseur du film d'huile. Pour cela nous disposons de la formule d'Ertel Grubin qui calcule l'épaisseur du film d'huile h :

$$h = \frac{1,6 \cdot a^{0,6} \cdot (\sigma_0 - \sigma) \cdot E^{0,03} \cdot R^{0,43}}{W^{0,13}}$$

où :

- * h : épaisseur du film d'huile
- * a : coefficient de viscosité par pression
- * u : vitesse moyenne de roulement
- * W : charge par unité de largeur du contact
- * E : module d'élasticité équivalent du couple de matériau
- * R : rayon de courbure équivalent
- * N_0 : viscosité dynamique à l'entrée du contact

Toute modification de ces paramètres entraîne une augmentation de l'épaisseur du film d'huile et diminue l'usure par fatigue.

Exemple d'application à un roulement

La théorie EHD dans le cas d'un roulement permet d'aboutir à des hypothèses simplificatrices qui font constater que l'épaisseur du film ne dépend presque exclusivement que de la viscosité de l'huile et de la vitesse.

Transcrite en fonction des paramètres usuels caractéristiques d'un roulement, la formule donnant h s'écrit sous la forme :

$$h = m \cdot D_m \cdot (u \cdot N)^{0,74}$$

où :

- * m : coefficient qui dépend du type de roulement
- * D_m : diamètre moyen du roulement en mm
- u : viscosité cinématique de l'huile à la température de fonctionnement en centistokes ou mm^2/s
- * N : vitesse de rotation du roulement en tours/minute

Les fournisseurs des huiles donnent les caractéristiques précises de leurs produit en particulier le diagramme viscosité-température. L'huile étant définie par sa viscosité nominale (en centistocks) à la température nominale de 40° Celcius. D'après les abaquas à cet effet, on en déduit la viscosité à la température de fonctionnement.

9.3.5. Quantité et qualité d'huile

La fabrication favorable ne peut être assurée que si le débit d'huile est suffisant. Dans des conditions normales d'utilisation l'on exige un débit minimal de sécurité dont l'ordre de grandeur est donné par les diagrammes.

La lubrification peut être améliorée par l'emploi d'additifs incorporés dans l'huile, en particulier les additifs anti-oxydants nécessaires à partir de 80°C.

Lorsque les pièces à lubrifier sont fortement chargées, l'on utilise des huiles avec des additifs "extrême pression",

L'huile de lubrification doit être propre par filtration des particules dont la taille est supérieure à 20 micro-mètre.

9.4. La lubrification à la graisse

L'utilisation croissante de pièces lubrifiées à la graisse, associée au développement du concept de graissage à vie, fait de la graisse un composant à part entière de la pièce à lubrifier.

Compte tenu des conditions de travail imposées au lubrifiant (laminage, malaxage), des graisses spéciales doivent être utilisées et qui ne peuvent être sélectionnées à la simple analyse de leurs caractéristiques physico-chimiques.

9.4.1. Choix de la graisse

Le choix de la graisse repose sur la connaissance des conditions de fonctionnement qui doivent être définies de la manière la plus précise possible :

- Température
- Vitesse
- Charge
- Ambiance

• Vibrations

Les constructeurs d'équipements en relation avec les fabricants de produits pétroliers testent les performances des graisses pour chaque condition particulière de fonctionnement au niveau des laboratoires de recherche.

9.4.2. Mise en œuvre

La quantité de graisse nécessaire au bon fonctionnement doit occuper un volume optimum selon des pondérations empiriques, lesquelles seront adoptées et ensuite normalisées.

Prenons l'exemple de graissage d'un roulement. La graisse doit occuper un volume égale à environ 20 à 30 % du volume libre interne de celui-ci, d'où la formule pratique :

$$G = 0,005 \cdot D_e \cdot B$$

Où :

- * G : la quantité de graisse en grammes ou cm^3
- * D_e : le diamètre extérieur du roulement en mm
- * B : la largeur du roulement en mm

Un excès de graisse est préjudiciable au bon fonctionnement du roulement, toutefois la quantité peut être augmentée de 20% pour les paliers munis d'un orifice d'évacuation de la graisse usée.

Par ailleurs, un roulement tournant à très faible vitesse tolère un plein remplissage, ce qui est favorable à sa protection en ambiance très polluée (galets de manutention,...).

9.4.3. Périodicité de graissage

Dans des conditions normales de fonctionnement, sans pollution extérieure et avec une retenue efficace, la durée de vie de la graisse est liée aux paramètres :

- de vitesse
- de charge
- de température

Particulièrement au delà de 80°C en fonctionnement continu, la durée de vie calculée de la pièce est souvent limitée par celle de la vitesse.

A titre indicatif, on peut dire que la durée de vie d'une graisse d'usage général est divisée par deux par tranche de 15°C au dessus de 80°C.

La détermination de la périodicité de graissage est essentiellement basée sur l'expérience de l'utilisateur et sur les moyens de surveillance qu'il peut mettre en œuvre avec l'aide de diagrammes mis à jour.

10. EFFICACITE DANS L'ORGANISATION DE LA GESTION EN MAINTENANCE

Ce chapitre que nous avons jugé nécessaire d'insérer, et que nous n'avons même pas su peut être l'intituler convenablement, n'est autre qu'un complément de culture en maintenance comportant des notions très élémentaires ou des notions juste à titre informatif et ce dans le souci pour parfaire à tous les concepts et méthodologie tant théorique que pratique de la fonction maintenance.

Planter, organiser, gérer, pratiquer, suivre sa maintenance au sens large et rigoureux nécessite fondamentalement des objectifs qualitatifs et quantitatifs. C'est pourquoi le besoin d'efficacité est impératif avec bien entendu la mesure quasi permanente du degré de performance de cette action en vue d'un apport correctif pour son adaptation rationnelle.

La maintenance est une dualité continue de l'organisation et de la gestion qui doivent permettre d'adapter les moyens aux besoins.

10.1. Niveaux de maintenance

Les cinq niveaux de maintenance énumérés habituellement sont donnés ici à titre indicatif comme exemple. Leur utilisation pratique n'est concevable qu'entre des parties qui sont convenues du nombre de niveaux et de leurs définitions précises, selon le type de bien à maintenir. Cette manière de faire ne fait que renforcer de l'ordre dans les opérations à mener.

1° niveau :

Réglages simples prévus par le constructeur au moyen d'organes accessibles sans aucun démontage ou ouverture de l'équipement, eu échange d'éléments consommables accessibles en toute sécurité, tels que voyants ou certains fusibles, etc.

2° niveau :

Dépannage par échange standard des éléments prévus à cet effet et opérations minutieuses de maintenance préventive, tels que graissage ou contrôle de bon fonctionnement.

Ce type d'intervention peut être effectué par un technicien habilité de qualification moyenne, sur place avec l'outillage portable défini par les instructions de maintenance et à l'aide de ces mêmes instructions.

On peut se procurer les pièces de rechange transportables nécessaires sans délai peu être et à proximité immédiate du lieu d'exploitation.

3° niveau :

Identification et diagnostic des pannes, réparations par échange de composants ou d'éléments fonctionnels, réparations mécaniques mineures et toutes opérations courantes de maintenance préventive telle que réglage général ou réaligement des appareils de mesure.

Ce type d'intervention peut être effectué dans les ateliers de maintenance, à l'aide de l'outillage prévu dans les instructions de maintenance ainsi que des appareils de mesure et de réglage et éventuellement des bancs d'essais et de contrôle des équipements et en utilisant l'ensemble de la documentation nécessaire à la maintenance du bien, ainsi que les pièces approvisionnées par le magasin.

4° niveau :

Tous les travaux importants de maintenance corrective ou préventive à l'exception de la rénovation et de la reconstruction. Ce niveau comprend aussi le réglage des appareils de mesure utilisés pour la maintenance et éventuellement la vérification des étalons de travail par les organismes spécialisés.

Ce type d'intervention peut être effectué par une équipe comprenant un encadrement technique très spécialisé, dans un atelier spécialisé doté d'un outillage général et éventuellement des bancs de mesure et des étalons de travail nécessaires à l'aide de toute documentation générales ou particulière.

5° niveau :

Rénovation, reconstruction ou exécution des réparations importantes confiées à un atelier central ou le cas échéant à une unité extérieure.

Par définition, ce type de travaux est donc effectué par le constructeur ou par le reconstruteur avec des procédures et moyens définis par le constructeur et donc proches de la fabrication.

10.2. Gestion des pièces de rechange en maintenance

Nous revenons à ce sujet tant négligé par les gestionnaires alors qu'il ne manque pas moins d'intérêt que les autres activités au niveau de son influence directe sur la maintenance.

Parmi les objectifs assignés à la gestion des stocks, cette fonction doit :

- permettre d'assurer une disponibilité des matériels
- répondre sans délai aux demandes d'articles
- définir la prévision des besoins
- immobiliser juste le capital nécessaire
- minimiser les coûts totaux de gestion de la pièce

Quant aux activités d'un magasin de stocks, il est impératif de s'occuper des fonctions classiques de :

- la réception
- le contrôle
- la codification et l'entrée au magasin
- le classement ou rangement
- la sortie des pièces de rechange

La philosophie de la variété et types de stocks en maintenance ramène à ce que la gestion des stocks devient une activité indissociable de la fonction maintenance.

Même bien géré, un stock est toujours source de dépenses car il immobilise un capital et implique des surfaces couvertes.

Une vigilance permanente lui est accordée que ce soit du point de vue de l'état des lieux pour servir encore ou soit du point de vue sécuritaire.

Cependant le stock doit être géré le plus rigoureusement possible. En effet, si sa gestion est négligée ou basée sur des principes erronés, il en découle :

1. des stocks anarchiques tels que pléthoriques qui peuvent entraîner des difficultés de trésorerie pour l'entreprise.
2. des ruptures destocks désorganisent la maintenance et par conséquent pénalise la production

Ces deux cas des stocks se traduisent directement par une augmentation du prix de revient de la production.

La maintenance est tributaire des paramètres des stocks en raison que :

1. les sorties sont beaucoup plus aléatoires que pour les consommables et excepté les besoins d'une maintenance systématique en mode d'échange standard
2. le stock de chaque pièce est très faible et donc présente un risque plus grand de rupture
3. la rupture de stock est souvent plus lourde de conséquences que celle d'un consommable car elle implique l'immobilisation de la machine
4. le coût des pièces est relativement élevé sinon très élevé pour les échanges standards de sous-ensembles

10.3. Plan d'actions en maintenance

S'organiser en maintenance c'est pouvoir ordonner ses tâches de manière à avoir à tout moment les renseignements nécessaires d'un tableau de bord en vue d'apprécier sa planification, de mesurer ses actions, de vérifier les indicateurs et d'expliquer les écarts pour analyser et orienter la politique de maintenance afin de prouver sa stratégie.

Schématisons ci-dessous un modèle d'algorithme des principales tâches en maintenance en cinq étapes principales.

1. Analyser et établir un diagnostic

1.1. Investigation au niveau de l'investissement

La maintenance doit ANIMER :

1.1.1. Investissement

- besoins
- études
- cahiers de charges
- appel d'offres
- choix du matériel
- formation

1.1.2. Suivi budgétaire

- taux ou gain de disponibilité
- coûts de actions à entreprendre

1.2. Investigation au niveau de l'exploitation

La maintenance doit ORGANISER en vue de :

- planifier les opérations
- préparer les opératuins
- associer le fabricant
- formation du personnel
- gérer et suivre l'incidence de la maintenance sur la capacité de production

- suivre les coûts
- se tenir informer des nouvelles solutions aux problèmes anciens
- suivi des paramètres de maintenance prédictive (vibrations, huile, MAO, ...)
- suivre les nouvelles tendances, nouvelles en matière de technologie et leur utilisation éventuelle dans l'entreprise

2. Définir et chiffrer les objectifs

2.1. Assurer la production prévue au plan de charge

La maintenance doit **ARBITRER** pour :

- contribuer à maintenir la qualité du produit fabriqué
- moyens nécessaires et tolérances
- délais de fabrication et maintenance

2.2. Rechercher les coûts optimaux

La maintenance doit **ETUDIER** afin de :

- assurer la sécurité
- qualité des réparations

2.3. Prendre en compte l'environnement

La maintenance doit **CONNAITRE ET RESPECTER** :

- pollution et nuisance
- économie d'énergie

3. Etudier et adopter les principes et les méthodes de la maintenance

La maintenance doit **FAIRE APPLIQUER** :

- la documentation générale
- la documentation du matériel
- la préparation des travaux
- l'ordonnancement

- le recours à des entreprises extérieures
- le stock des pièces de rechange
- l'informatisation de la maintenance

4. Définir les indicateurs

La maintenance doit **ANALYSER ET ORIENTER**
LA POLITIQUE pour :

- maîtrise des coûts
- analyse des ratios
- politique de maintenance

5. Former le personnel et s'informer

La maintenance doit **AVEILLER ET ADOPTER**
LA STRATEGIE de :

- stages de formation
- technologies nouvelles
- nouvelles organisation
- démarche globale stratégique

10.4. Liaison entre la maintenance et la production

Les liaisons des services maintenance, parfois délicates, avec la fabrication et les interactions en mode fonction de maintenance avec d'autres grandes fonctions stratégiques de l'entreprise ont conduit la maintenance à gagner ses titres de noblesse.

Une fois, le processus d'amélioration des méthodes et outils de gestion de la fonction maintenance mis en place, ou simultanément, il faut entreprendre de placer la fonction maintenance à la place qui lui revient dans l'entreprise.

C'est le programme d'une démarche globale, approche ouverte et rationnelle entre les services de maintenance et ceux de production. Le cas, par exemple de la démarche Japonaise que nous verrons ci-dessous est très impressionnant.

Cette approche est beaucoup plus un état d'esprit qui suppose généralement quelques changements dans la manière dont les décisions sont prises au niveau entreprise avec son potentiel global, qu'une méthode pour améliorer les prestations et l'organisation de la maintenance.

En conséquence, la maintenance devient l'affaire de tous les hommes de l'entreprise où il ne sera plus possible de faire la différence entre homme de maintenance et opérateur de fabrication.

Insensiblement les agents de fabrication pourront bien faire une partie du travail de maintenance. Dressons ci-dessous un tableau qui manifeste un exemple de jumelage de fonction à travers un programme de démarche entre la maintenance et la production.

Actions	Objectifs	Responsabilités
Maintenance autonome	<ul style="list-style-type: none"> • Amélioration de la technicité de l'opérateur • Réduction des arrêts momentanés • Résultats directs 	Fabrication
Améliorations spécifiques	<ul style="list-style-type: none"> • Réduction des pertes • Sujets techniques planifiés • Solutions techniques 	Fabrication Maintenance Bureau d'études
Fabrication interne d'équipements	<ul style="list-style-type: none"> • Développement outillage • Fiabilité des équipements 	Maintenance
Développement technique	<ul style="list-style-type: none"> • Automatisation Coûts d'énergie 	Bureau d'études

Pour ce faire, on peut estimer à court terme que le gain est immédiat car une organisation de la gestion en maintenance peut permettre :

- de rationaliser les coûts de maintenance
- de différer des investissements face à une nécessité d'accroissement de production en tirant plus des équipements existants
- de permettre la concrétisation des actions de diminution des stocks et de gestion des flux

- de rentabiliser les immobilisations financières

En outre, l'on peut attendre à moyen et long terme :

- un décloisonnement structurel
- l'introduction réussie d'une nouvelle génération d'équipements
- la fourniture d'un axe méthodologique et une certaine cohérence par rapport à un plan d'augmentation de productivité
- une libération de la spécialisation

Ceci a conduit les Japonnais à travers les développements des techniques d'organisation de la gestion d'entreprises à formuler la Totale Productive Maintenance (TPM).

Ceci étant le résultat d'une évolution progressive de leur industrie dont les principales étapes sont décrits ci-après :

Le passage, au cours des années 50 de la maintenance corrective à la maintenance préventive a permis de réduire le nombre de pannes et par conséquent, les coûts qui y sont liés.

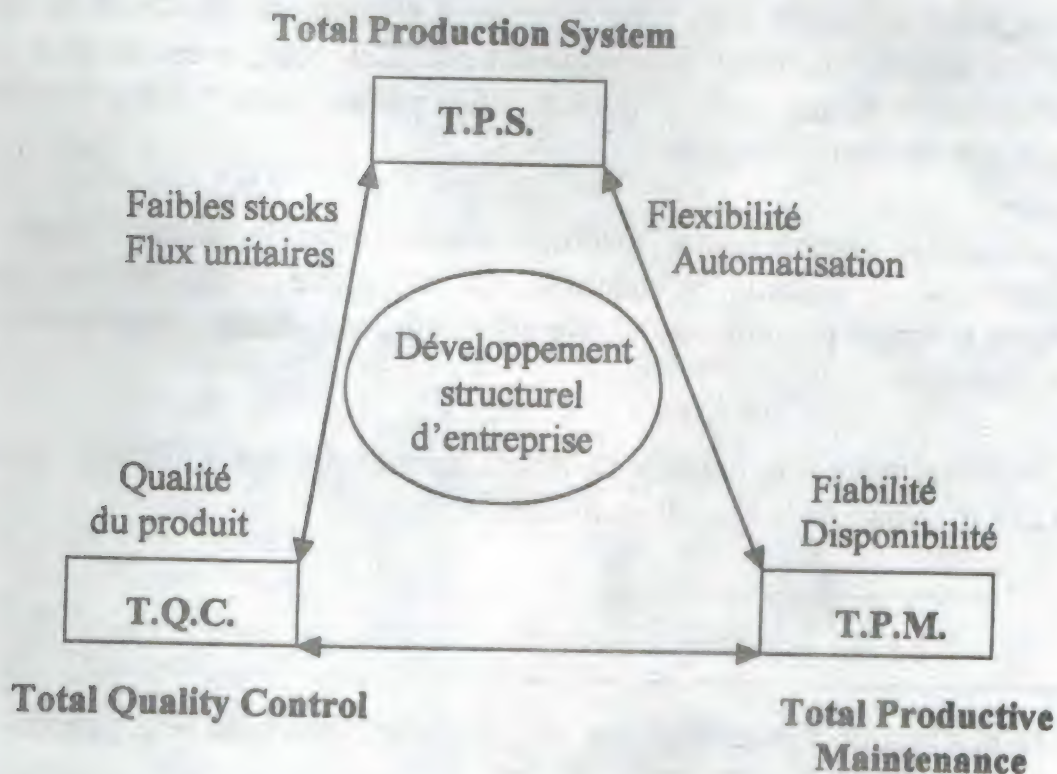
Dans les années 60, les contraintes liées à la maintenance ont commencé à être pris en charge au stade de la conception des équipements, par l'introduction des critères de fiabilité, de maintenabilité et de disponibilité, de coût total de l'équipement sur toute sa durée de vie.

L'élargissement du concept de maintenance abouti la fin des années 70 à la "Total Productive Maintenance" (TPM). Ce nouveau concept implique une approche du type "système", c'est à dire qui envisage tous les aspects tout en faisant appel à :

- la participation
- la motivation
- l'adhésion

les plus larges possibles du personnel dans toute l'entreprise.

Le but de cette démarche ouverte est d'assurer une productivité maximale des équipements, et de permettre d'envisager à terme l'existence d'ateliers entièrement automatisés pouvant fonctionner en régime permanent et sans intervention d'opérateur.



Ces évolutions déplacent le problème de l'homme vers la machine. Cela conduit à une exigence accrue de fiabilité. Il faut améliorer la machine pour que l'homme soit plus efficace.

10.5. Indicateurs de maintenance

Il faudrait apprécier à chaque fois le degré d'efficacité de la conjugaison des actions en maintenance ou savoir le rendement ou productivité en le comparant continuellement à ses différentes fluctuations.

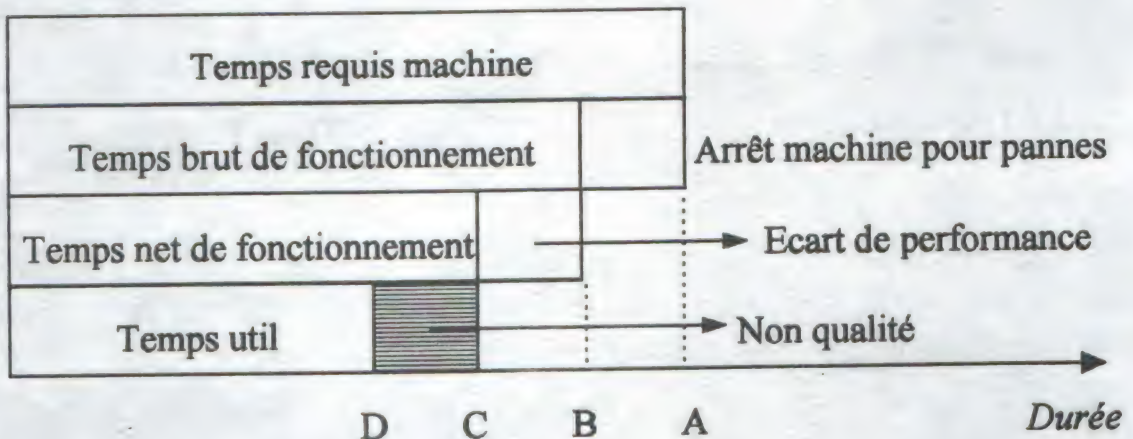
De ce fait il est impératif de trouver un outil qui permette de valoriser un certain nombre de données physiques qui caractérisent les pertes et qui puisse servir à hiérarchiser et classer ces pertes par :

- nature (arrêt, performance, qualité)
- secteur d'activité
- origine (conception, maintenance, utilisateurs, produits, etc)

Il doit servir bien entendu d'outil de suivi des modifications et des progrès effectué, grâce à sa nature même d'élément de chiffrage faisant partie du tableau de bord d'un équipement. Cet outil, c'est le taux de rendement synthétique ou TRS qui est défini par un rapport entre le temps util et le temps requis machine.

Le temps requis d'une machine est définissable comme étant la période pendant laquelle la machine est susceptible d'être utilisée. On distingue le temps pendant lequel elle est arrêtée et le temps pendant lequel elle fonctionne.

Schématisons graphiquement l'interdépendance des différents temps dans une machine de la manière suivante.



Le temps requis de la machine de valeur A se décomposer en :

- un temps d'arrêt pour pannes (A-B)
- un temps brut de fonctionnement de valeur B qui est le temps effectif de disponibilité.

Le temps effectif de disponibilité B se décompose à son tour en :

- un écart de performance (B-C), lié aux conditions aléatoires et mineurs ainsi qu'à un défaut de cadence
- un temps net de fonctionnement C

Le temps net de fonctionnement se décompose en :

- temps perdu pour cause de non qualité (C-D) à cause des rebuts, retouches, déchets et chutes
- temps utile de valeur D

Ainsi les pertes de temps schématisées sur le graphique pour cause :

- A-B : arrêt machines pour panne
- B-C : écart de performance
- C-D : non qualité

sont valorisées et comparées aux temps y afférents, pour estimer leurs taux respectivement comme suit :

- B / A : taux brut de fonctionnement
- C / B : taux de performance
- D / C : taux de qualité

Comme le taux de rendement synthétique TRS s'écrit de la forme :

$$\text{TRS} = \frac{\text{Temps util}}{\text{Temps requis machine}} = \frac{D}{A}$$

On peut décomposer les temps et en tenant compte des pertes pour chaque temps, l'on peut écrire que le taux TRS et le produit est le produit des trois taux énoncés ci-avant.

$$\text{TRS} = \frac{D}{A} = \frac{B}{A} \times \frac{C}{B} \times \frac{D}{C}$$

La valeur de la TRS est comprise généralement entre 40 à 60 % si l'on chiffre correctement les temps alloués pour chaque type de perte

10.5.1. Taux brut de fonctionnement

Pour réduire les pertes relatives à ce taux (B / A), il faudrait limiter le nombre de pannes ou défaillances aléatoires, les arrêts de réparation et réglages et ou les arrêts inutiles pour minimiser la différence ($B - A$), et par conséquent augmenter le temps brut de fonctionnement B .

Comme exemple citons la valeur de ce taux pour une machine automatique d'usinage : 95 à 98 %.

10.5.2. Taux de performance

Ce taux (C / B) résulte du produit de deux facteurs qui sont :

- le taux net de fonctionnement : TNF
- le rendement vitesse : RV

$$C / B = \text{TNF} \times \text{RV}$$

Définissons les taux TNF et RV comme suit :

$$\text{TNF} = \frac{\text{Quantité réalisée (Q) x Temps de cycle réel (Tr)}}{\text{Temps requis (A) - Temps d'arrêt (A - B)}}$$

$$\text{TNF} = \frac{Q \cdot \text{Tr}}{B}$$

$$\text{RV} = \frac{\text{Temps de cycles théorique}}{\text{Temps de cycles réels}} = \frac{Tt}{Tr}$$

Donc :

$$\frac{C}{B} = \text{TNF} \times \text{RV} = \frac{Q \cdot \text{Tr}}{B} \times \frac{T_t}{\text{Tr}} = \frac{Q \cdot T_t}{B}$$

D'où : $C = Q \times T_t$

Il en résulte que le taux de performance dépend de la quantité réalisée et aussi du temps de cycle théorique. Il convient donc de vérifier que la valeur du temps de cycle théorique n'est pas entachée d'un coefficient méthode, souvent utilisé pour tenir compte des micros aléas de fonctionnement.

A titre d'exemple, pour une machine automatique d'usinage, si :
TNF = 60 à 80 % et RV = 90 %, le taux de performance est de 54 à 72 %

10.5.3. Taux de qualité

Il se définit de la façon suivante :

$$\frac{D}{C} = \frac{\text{Quantité totale (C)} - \text{Quantité rebutée (C - D)}}{\text{Quantité totale (C)}}$$

Pour améliorer la valeur de ce taux, couramment voisine de 95 %, l'objectif peut être d'avoir moins de 1 % de quantités rebutées ou retouchées.

En définitive l'exemple des machines automatiques d'usinage donne une valeur du taux TRS de l'ordre de 51 à 78 %.

En conclusion, la maintenance doit veiller à ce que le TRS devienne un objectif ou une grandeur significative (exemple TRS \geq 85 %) si l'on fixe également les trois autres taux avec les valeurs ci-dessous :

- taux brut de fonctionnement = 90 %
- taux de performance = 95 %
- taux de qualité = 99 %

11. L'INFORMATIQUE ET LA MAINTENANCE

11.1. Généralités

L'introduction des nouvelles techniques de traitement et de diffusion des informations dans le domaine de la maintenance permet :

- en particulier de mécaniser certaines tâches manuelles et ainsi de diminuer les frais généraux correspondants
- de fournir à tout le personnel de maintenance des informations plus détaillées et sélectives sous des formes directement exploitables et opérationnelles en temps réel
- d'améliorer la gestion, l'activité et les techniques de maintenance

11.2. Nécessité de l'outil informatique

Grâce au progrès de l'informatique conversationnelle et des systèmes de gestion de bases de données (SGBD), l'informatique de maintenance est devenue une nécessité au plan :

- économique
- technique
- organisationnel

compte tenu notamment de :

- des coûts de maintenance élevés qui gèrent les prix de revient
- de la complexité et de la diversité des matériels
- des réglementations rigoureuses en vigueur
- des effectifs croissants à gérer
- de la masse d'information à traiter
- du souci de libérer les techniciens des tâches administratives

- accrître la rigueur dans l'analyse et dans le report des informations.

11.3. Spécificités

Les exigences évolutives actuelles de la maintenance impose pour l'outil informatique quelques spécificités. En particulier au plan du logiciel, il faut envisager :

- une conception modulaire, dont les diverses fonctions sont séparables (réapprovisionnement, gestion des historiques, codification des incidents, etc)
- une conception ouverte ; permettant d'intégrer ultérieurement d'autres modules et donc une conception évolutive et extensible pour de nouvelles fonctions (maintenance conditionnelle, banque d'images, etc)
- une conception intégrée, avec une base de données unique et volumineuse qui permet d'établir aisément les liens entre les nombreuses informations de maintenance
- un interfaçage possible avec d'autres systèmes (gestion de production, paie, comptabilité, etc)
- un fonctionnement en temps réel : les mises à jour multiples sont immédiatement réalisées
- la possibilité de déporter sur d'autres sites certaines fonctions
- une utilisation par tous et sur le terrain
- une possibilité d'accès par code aux différents niveaux du logiciel (problèmes de sécurité)

11.4. Modèle d'organisation des données

Selon l'adaptation aux besoins d'être informé sur quoi et comment, il est par conséquent impératif d'organiser les supports informatiques selon un choix judicieux. Nous présentons ci-après un modèle général qui tout de même associe les principaux aspects en maintenance notamment :

11.4.1. Gestion des nomenclatures

- Découpage du matériel
 - * par fonction
 - * par type
- Nomenclature des pièces de rechange

11.4.2. Suivi des coûts et des performances

- Analyse des coûts
 - * par intervention
 - * par matériel
 - * par activité
 - * par secteur
- Analyse des indicateurs techniques
 - * fiabilité
 - * maintenabilité
 - * disponibilité
- Frais de fonctionnement pour assurer la fonction maintenance
- Autres

11.4.3. Fiche historique

- Historique valorisé par matériel avec
 - * la désignation des interventions
 - * la nature des défaillances
 - * les pièces de rechange utilisées
 - * les temps passés

11.4.4. Gestion des commandes et des fournisseurs

- Editions des commandes
- Réapprovisionnement automatique si cela est possible
- Références des constructeurs et ou fournisseurs

11.4.5. Ordonnancement et lancement

- Tenue de la charge de travail
- Tenue de la capacité disponible
- Classement des O.T. (Ordres de Travail) par urgence
- Ordonnancement des travaux

11.4.6. Préparation du travail

- Aide à la préparation du travail
 - * modes préparatoires préétablis
 - * liste des pièces de rechange nécessaires
- Aide au diagnostic
 - * par l'intermédiaire des logiciels de tests et des systèmes experts

11.4.7. Maintenance préventive

- Déclenchement et suivi de la maintenance préventive en fonction de l'état du matériel (suivi des paramètres d'usure) et d'un échéancier

11.4.8. Gestion du magasin

- Gestion des consommables et des pièces de rechange
 - * entrées
 - * sorties
 - * inventaires
 - * réceptions
 - * autres
- Valorisation du stock

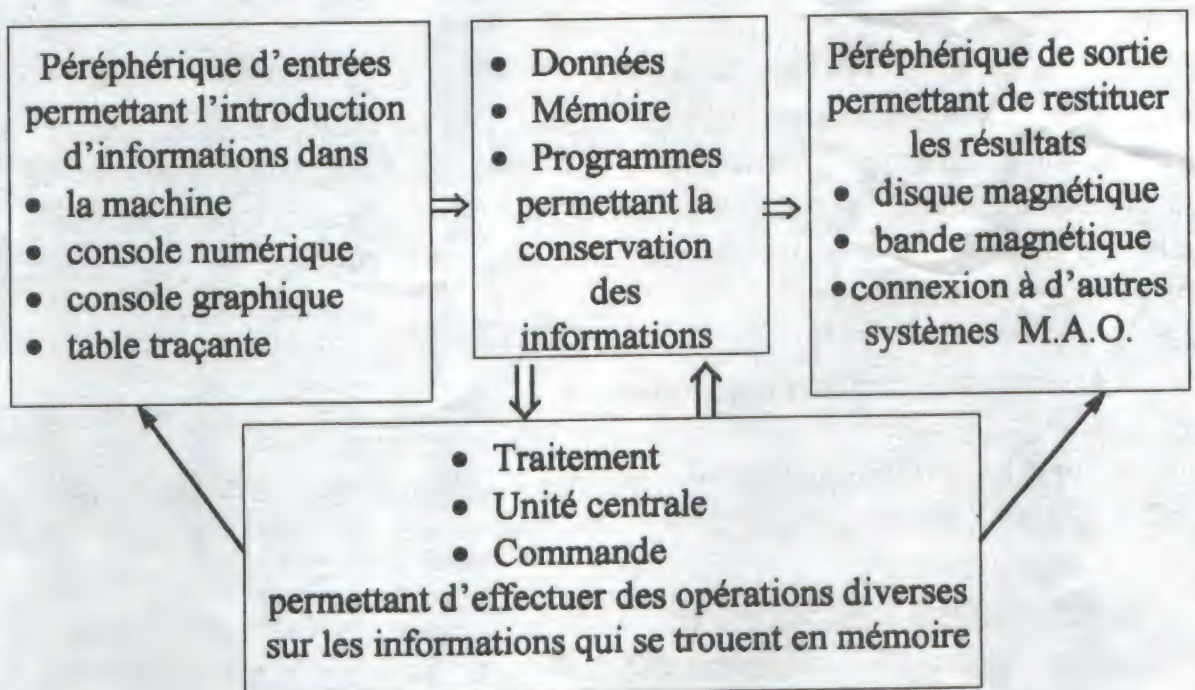
11.4.9. Documentation technique

- Fiches techniques par matériel avec
 - * caractéristiques techniques et description fonctionnelle
 - * modes opératoires
- Références des articles et dessins

11.5. Maintenance Assistée par Ordinateur : M.A.O.

Le système M.A.O. ou Maintenance Assistée par Ordinateur est un système informatique intégré d'aide aux opérateurs de maintenance dont l'outil principal est l'ordinateur qui est destiné à traiter les informations qui lui sont fournies sous forme de "données" enregistrées sur des supports.

La structure matérielle d'un système M.A.O. peut être représentée suivant le synoptique suivant :



11.6. Systèmes experts

La maintenance conditionnelle se développe et avec elle les capteurs. Plus leur nombre augmente, donc les mesures augmentent, et plus leur traitement devient difficile. Leur analyse est pourtant nécessaire pour aider au diagnostic ou à l'établissement d'un plan de maintenance.

Les seuls moyens qui devront être utilisés pour relier le système de prélèvement de ces informations de maintenance conditionnelle à un système de management de la maintenance sont les systèmes experts.

Le domaine de l'intelligence artificielle tend à apporter une réponse à ce type de problème. Depuis quelques années les systèmes experts sont développés ; ce sont des logiciels spécialisés. Ils tentent de simuler les activités intellectuelles de l'homme dans le cas où une solution algorithmique n'est pas connue.

On peut très schématiquement, dire qu'un système expert va s'attacher à représenter et utiliser des connaissances qui seront considérées comme des données.

Ces connaissances peuvent être imprécises ou incomplètes et souvent il est impossible de décrire un algorithme permettant de résoudre le problème dans tous les cas (ou cela prendra un temps trop long) ; on parle alors d'heuristique qui peuvent utiliser un certain nombre de règles tant théoriques qu'empiriques.

Ces systèmes experts comportent :

- une base de connaissances remplie et mise à jour par l'expert avec l'aide, généralement d'un ingénieur de la connaissance ou cognitif
- une base de faits comme par exemple la description des symptômes
- un moteur d'inférences qui doit relier les deux bases précédentes pour aboutir à une solution acceptable

Exemple

Le premier exemple de couplage vidéodisque et système expert a été réalisé au Centre de recherche de la Société "General Electric" à Schenectady aux USA. Ce modèle détecte, en temps record et par le biais de questions simples à l'opérateur, toute panne sur une grosse locomotive. Il guide l'homme en lui fournissant des conseils, en lui projetant les schémas appropriés et en lui montrant, par vidéo interposé, la meilleure façon d'intervenir.

12. LA MAINTENANCE ET LA SECURITE DE TRAVAIL

12.1. Généralités

La sécurité, l'hygiène et la conservation de la santé des travailleurs est une tâche importante pour les gestionnaires d'entreprises car le travail influe directement sur la santé des travailleurs ainsi que les conditions de travail qui jouent un rôle important. Elles doivent être favorables envers la santé et la productivité de chaque travailleur.

La tâche principale de l'hygiène et sécurité dans l'entreprise est de protéger la capacité physique du travailleur des risques d'accidents et de maladies professionnelles en mettant à leur disposition les moyens matériels, financiers et humains.

Employer incorrectement ou de façon négligente les outils, les machines et les équipements présente un danger pour leurs utilisateurs. Il est donc primordial de respecter les méthodes de travail offrant toute sécurité. Ce sont généralement les plans appropriés les plus efficaces.

Trop nombreux sont les accidents attribuables au manque de prudence au travail et non respect des règles de sécurité en général. Les conséquences d'un accident de travail justifient amplement l'effort qu'exige l'acquisition d'habitudes de travail offrant toute sécurité ou de familiarisation avec le milieu de travail sécurisant.

Les associations pour la prévention des accidents, les conseils de sécurité, les organismes gouvernementaux et les industries établissent des programmes d'hygiène et de sécurité destinés à diminuer le nombre d'accidents. Malheureusement, il se produit chaque année des accidents occasionnant des pertes de temps et d'argent, en plus des souffrances et des incapacités temporaires ou permanentes qu'ils entraînent.

De nos jours, les machines sont munies de dispositifs de sécurité, mais leur utilisation est la responsabilité de l'opérateur. Comme la sécurité est la

responsabilité de chacun, l'opérateur a sa sécurité entre ses mains car il suffit de faire preuve de prudence et de bon jugement.

Une mauvaise attention au respect des règles de sécurité et d'exploitation des machines conduit aux accidents. Parfois l'erreur d'une personne conduit aux accidents mortels des personnes. Les accidents de travail ont une grande influence sur le plan financier, production et surtout humain car l'homme est le bonheur de la famille, c'est aussi l'élément constituel de la société, protégeons le en premier.

Les gestionnaires d'entreprises ne doivent pas sous estimer la sécurité de travail et doivent prendre des mesures pour diminuer la fréquence et la gravité des accidents dans l'entreprise. Il existe pour cela un certain nombre de dispositifs, de consignes et de règlements dit de sécurité. Faire œuvre de prévention ne peut pas être la seule responsabilité des gestionnaires de l'entreprise. Il est absolument nécessaire de donner à l'ensemble du personnel un véritable esprit de sécurité qui lui permettra de prévoir et d'agir de façon efficace dans toutes les circonstances.

12.2. Règles de base de la sécurité

Chaque accident de travail résulte d'une négligence de quelqu'un. On peut éviter l'accident par l'apport et l'implication des responsables de sécurité, des ingénieurs et techniciens qui doivent veiller à assurer :

- les meilleures conditions possibles de sécurité de travail
- l'apprentissage permanent aux travailleurs des méthodes de sécurité

Pour cela, il existe des instructions à organiser pour les travailleurs telles que :

a - Instructions générales

Ces instructions sont destinées pour tous les travailleurs sans exception et elles comprennent les connaissances avec l'entreprise, avec l'ordre de travail (l'ordre de travail et la sécurité vont de pair), les places et lieux les plus dangereux et nuisibles.

b - Instructions relatives au poste de travail

Ces instructions sont destinées pour les nouveaux travailleurs ou ceux qui sont chargés des postes de travail ou d'ateliers. On leur indique les parties dangereuses de l'équipement, les règles de sécurité appropriées à respecter vis-à-vis de l'équipement et de l'atelier.

Il est aussi nécessaire d'organiser régulièrement des séminaires périodiques pour revoir et faire rappeler les instructions de sécurité de travail en général et spécifiques aux postes de travail.

c - Instructions de protection individuelle

A ces deux instructions citées auparavant, nous ne manquons pas de rappeler la protection individuelle même si elle se révèle un peu gênante, elle est absolument nécessaire et peut sauver le travailleur des graves infirmités.

- Le casque protège le crâne contre les chocs et son port est obligatoire sur les lieux de travail.
- Les lunettes isolent les yeux des poussières, des particules provenant du meulage, des acides, des rayons de l'arc électrique, etc. Le type de lunette à porter doit convenir au type de travaux à effectuer.
- Les masques évitent l'installation des poussières ou gaz dont les conséquences sont parfois désastreuses pour la santé.
- Les gants protègent les mains des écorchures et des maladies telles que les dermatoses.
- Les souliers renforcés sont une sécurité contre les chutes de matériaux, les chocs, la pénétration de pointes, etc ;
- Le tablier est utilisé lorsqu'il y a risque de brûlures par corps chauds ou corrosifs.
- Les protèges tympons ou stop bruit sont utilisés dans les ateliers où le bruit est intense, dépassant les normes. Son utilisation évite la surdité.
- Les écrans à verre filtrants des soudeurs protègent les yeux des radiations.

12.3. Les accidents de travail et maladies professionnelles

Les accidents de travail et maladies professionnelles sont ceux qui sont engendrées lors de l'exécution de travaux. Selon leur gravité on distingue :

a - Les accidents légers

Il s'agit de traumatisme léger sans arrêt de travail et l'accidenté peut reprendre son travail juste après les premiers soins d'urgence.

b - Les accidents graves

Dans ce cas l'accidenté ne peut pas reprendre son travail. Il lui sera délivré un arrêt de travail de plusieurs jours ou semaines. Dans ce cas l'accidenté est normalement pris en charge par la sécurité sociale.

c - Les accidents mortels

a - Les accidents collectifs ou maladies professionnelles

Aux maladies professionnelles se rapportent toutes les maladies qui apparaissent lors de l'exécution des travaux. Généralement elles sont dues à l'atmosphère (gaz toxique, poussière, radiations, conditions de travail pénibles, etc).

12.4. Organisation de la sécurité au sein de l'entreprise

a - La direction de l'entreprise

Elle doit avoir une grande influence sur l'application stricte des règles de la sécurité au sein de l'entreprise. Elle doit nommer le responsable de sécurité.

b - Le responsable de sécurité

Il examine les différents problèmes de sécurité avec le personnel, mais le plus souvent avec les contre-maîtres en leur formulant les recommandations nécessaires. Il doit généralement :

1. Formuler la politique générale de l'entreprise en matière de prévention des accidents et d'en surveiller son application.
2. Faire des rapports réguliers à la hiérarchie et la conseiller sur toute mesure à prendre vis-à-vis de la sécurité de travail.
3. Donner les directives au personnel.
4. Mener des enquêtes sur les accidents de travail.
5. Tenir à jour le registre des relevés statistiques des accidents.
6. Suivre la formation du personnel en matière de sécurité.
7. Etudier les installations, les opérations et les méthodes de travail.
8. Contrôler le matériel et moyens de lutte et de protection contre les incendies et diriger les exercices d'alerte et d'évacuation.

Le responsable de sécurité a une autorité spéciale lorsqu'il s'agit d'exécuter un travail exigeant avec des précautions particulières. S'il découvre un danger d'accident, il peut ordonner l'arrêt du travail jusqu'à ce que les précautions nécessaires seront prises en compte.

c - Le contre-maître

Au niveau des ateliers, le contre-maître représente la direction, donc il doit veiller quant à l'application stricte des règles de sécurité. Il doit être en mesure de résoudre les problèmes de sécurité qui se présentent dans telle ou telle situation.

d - Le médecin de travail

Le médecin de travail doit :

1. Examiner régulièrement le personnel.
2. Faire le suivi du dossier médical.
3. Examen médical de reprise après chaque arrêt de travail.

4. Apporter les premiers soins d'urgence lors des accidents de travail.
5. Connaître les conditions de travail dans les différents ateliers et équipements.

e - Le comité de sécurité

Il se compose essentiellement d'un représentant de la direction de l'entreprise, généralement c'est le responsable de sécurité et les membres représentants des travailleurs.

Le comité de sécurité a pour tâche d'améliorer les conditions et la sécurité de travail tout en assurant une collaboration entre la direction et les travailleurs. Il doit examiner les accidents survenus, leurs causes et prévoir les mesures nécessaires pour éviter leur répétition.

12.5. Causes des accidents et maladies professionnelles

Les conditions essentielles pour la lutte contre les accidents de travail et maladies professionnelles consiste à faire une analyse des accidents permettant d'étudier et d'élaborer les mesures de lutte et de prévention.

Dans les méthodes statistiques chaque accident de travail est analysé selon la profession, le caractère de travail, le caractère de l'accident, etc.

Dans les méthodes techniques, chaque accident est étudié et analysé pour déterminer les mesures de prévention. (Calcul du taux de fréquence et de la gravité des accidents).

Les causes peuvent être techniques, d'organisation, sanitaires et hygiénique.

a - Causes techniques

- Mauvais état de construction.
- Enconbrement.

- Non conformité du processus technologique aux règles de sécurité.
- Non respect des règles de sécurité.

b - Causes d'organisation

- Absence de surveillance technique sur l'organisation de la sécurité.
- Absence de l'instruction de sécurité.
- Absence ou mauvais état des moyens de protection individuelle.

c - Causes sanitaires et hygiéniques

- Ventillation insuffisante.
- Eclairage insuffisant.

D'autres causes conduisant aux maladies professionnelles peuvent être citées dans ce contexte telles que :

• Température des ateliers :

Elle dépend essentiellement des sources de chaleur, volume de l'atelier, circulation d'air. Dans l'organisme humain ont lieu des réactions accompagnées de dégagement de chaleur. Au repos elle est évaluée à 1,5 Kcal/mn et en activité à 8 à 10 Kcal/mn. 30 % de la chaleur est restituée par conductibilité et convection, 45 % par émission calorifique et 5 % par respiration.

Avec l'élévation de la température, le maintien de l'équilibre thermique avec l'atmosphère ne s'effectue que par évaporation intense du corps. Cette dernière conduit aux maladies cardio-vasculaires.

Le refroidissement du corps humain dépend de la température, de la vitesse et de l'humidité de l'air. Avec l'augmentation de l'humidité, le refroidissement diminue.

Les ateliers en général doivent être équipés d'un système de ventilation pour l'évacuation non seulement de la chaleur mais aussi des gaz, poussières, etc. La ventilation peut être naturelle ou artificielle.

• Absorption des substances toxiques :

Les substances toxiques peuvent être absorbées par voie respiratoire, digestive ou par la peau. Elles peuvent être sous forme de vapeur de gaz ou liquide. Le danger d'empoisonnement dépend du type de substance, du temps d'action et de la concentration.

Les types de substances toxiques peuvent s'accumuler dans les ateliers sous forme d'oxydes d'azote, de gaz sulfureux, d'oxyde de carbone, etc. Même les poussières sont nuisibles pour la santé malgré qu'elles ne sont pas toxiques.

Pour des teneurs supérieures à 0,1 % de CO, il existe une intoxication. La norme hygiénique au CO est fixée à 0,0024 %. Pour le H₂S, elle est de 0,00066 %. Les oxydes d'azote NO, N₂O, N₂O₃, N₂O₅ provoquent une irritation muqueuse des yeux, du nez, de la gorge, des bronches et des poumons; la teneur admissible étant de 0,0002 %.

Quelques mesures de prévention peuvent être envisagées telles que :

- Ventillation et aspiration des poussières et vapeurs.
- Nettoyage et éloignement des locaux insalubres.
- Protection individuelle avec combinaison étanche et masque de respiration.
- Hygiène corporelle à l'issu du travail.
- Eviter de manger et de boire sur les lieux de travail.
- Changer les vêtements sitôt le travail terminé.

12.6. La sécurité à l'atelier mécanique

A l'atelier mécanique, la sécurité fait l'objet de mesures que l'on retrouve dans l'une des catégories suivantes :

- précautions personnelle
- propreté
- fixation des pièces et machines outils
- usinage des pièces

Il serait difficile d'énumérer ici toutes les règles de sécurité concernant toutes les pratiques dangereuses mais nous essayons tout de même de présenter les règles générales.

a - Précautions personnelles

- On ne doit jamais porter de vêtements amples sans partie flottantes susceptibles d'être happés par une machine.
- Il faut enlever cravate et foulard.
- Il faut relver les manches jusqu'aux coudes.
- Enlever montre, bracelet et bague.
- Un filet ou casque doit retenir les cheveux longs.
- Le port de verres protecteurs ou de visières protectrices est obligatoire lorsqu'on travaille sur les machines outils.
- Le rangement des outils évite un contact fortuit avec une partie tranchante ou pointue.
- Un outil en mauvais état est une source de d'accident, maintenez les en bon état.
- Utiliser l'outil qui convient le mieux au travail que vous devez exécuter.
- Il ne faut jamais mettre dans les poches des outils coupants ou piquants.
- L'emmanchement des outils ainsi que leur état seront toujours vérifiés avant l'utilisation.
- Un outil qui tombe pendant les travaux en hauteur peut provoquer un accident.
- Ne jamais soulever une charge plus lourde que celle indiquée sur l'appareil de levage.
- Le transport du personnel est strictement interdit sur les engins de manutention mécanique.
- Il faut s'assurer du bon état des câbles métalliques, chaînes, cordages et élingues avnt leur utilisation.

- Ne jamais stationner sous les charges

b - Propreté

L'ordre de propreté contribue beaucoup dans l'amélioration de la sécurité dans les ateliers.

- Ne pas laisser trainer les objets qui puissent encombrer les passages.
- Les passages dans les ateliers ne doivent pas servir d'entrepôts.
- Le nettoyage de la machine exige que celle-ci soit arrêtée.
- La machine doit être toujours gardée propre sans huile ni copeaux.
- Le plancher doit être exempt de graisse et d'huile.
- Il faut éviter de poser des outils ou des matériaux sur la table de la machine-outil.
- Le plancher doit être souvent balayé pour enlever les copeaux.
- Eviter de laisser des outils ou des matériaux à proximité des machines-outils.

c - Fixation des pièces et machines outils

- Vous devez connaître la machine et vous préserver de ses dangers en utilisant chaque fois les dispositifs et matériels de sécurité.
- Veiller bien à ce que les transmissions soient enfermées dans des protecteurs.
- Il ne faut jamais graisser un engrenage pendant la marche ou remonter une courroie en marche.
- Il ne faut jamais évacuer les copeaux à main nue et sans crochet et balayette.
- Il ne faut jamais procéder à des réglages ou modifications de l'appareillage mécanique ou électrique sans y être spécialement invité.
- Il faut toujours respecter les vitesses de rotation indiquées sur les machines.

- Avant d'exécuter un travail sur une pièce, il faut la débarasser de ses bavures et des arêtes vives à l'aide d'une lime.
- Il faut demander l'aide de quelqu'un pour soulever un objet trop lourd ou de forme particulière.
- Il faut se servir des muscles des jambes pour soulever les objets lourds et non des muscles du dos c'est à dire faites travailler les cuisses et les bras et non pas les reins.
- Il faut s'assurer que la pièce est bien fixée dans l'étau ou à la table de la machine.
- Si on utilise des dispositifs de serrage pour fixer une pièce, il faut que les boulons soient le plus près possible d'elle.
- Toutes les pièces doivent être correctement installées avant de remettre une machine en marche.
- Les pièces et outils à arrêter usées doivent être remplacées.
- Utiliser des clés appropriées pour serrer ou desserrer un écrou ou un boulon.
- Tirer sur une clé offre plus de sécurité que la pousser.
- Enlever la clé du mandrin avant de mettre en marche.

d - Usinage des pièces

- Il ne faut jamais faire fonctionner une machine avant d'avoir compris le fonctionnement de son mécanisme. Il faut aussi connaître les moyens de l'arrêter rapidement en cas d'urgence.
- Il faut tenir ses mains éloignées de toute pièce en mouvement.
- Il faut toujours que la machine soit arrêtée pour la nettoyer, la régler ou pour mesurer la pièce travaillée.
- Il est important que tous les dispositifs de sécurité soient en place avant de faire fonctionner une machine.
- Ne pas tenter d'arrêter le mandrin avec ses mains.
- Il est très dangereux d'utiliser un chiffon près des pièces en mouvement d'une machine.
- Le fonctionnement d'une machine ne doit être assuré que par une personne à la fois.

12.7. La sécurité à l'atelier électrique

Les règles de sécurité énoncées pour l'atelier de mécanique s'appliquent également à l'atelier électrique avec en plus voici quelques points particuliers :

- Sachez tout d'abord qu'une tension supérieure à 25 Volts en courant continu et 50 Volts en courant alternatif est un danger pour l'être humain.
- Il ne faut jamais pénétrer dans les salles réservées aux installations électriques sans autorisation.
- Vérifier soi-même que les lignes nues lesquelles on doit travailler sont mises à la terre.
- Si le circuit doit demeurer alimenté, ne travailler que d'une main à la fois.
- Les réparations et interventions sur les installations électriques doivent être effectuées par un personnel qualifié.
- Il faut absolument éviter les bricolages et se servir d'outils isolés.
- Si l'on doit effectuer des travaux en hauteur, utiliser un échaffaudage approprié de préférence à un escabeau car en cas de choc électrique la chute est plus probable d'un escabeau.
- Ne pas confondre le « neutre » avec la « mise à la terre ».
- Ne jamais démarrer ou mettre en marche un équipement dont on ne connaît pas le fonctionnement
- Se familiariser avec les fonctions d'un panneau de commande électrique avant d'en toucher un des éléments.
- Avant de débiter un travail sur un système, repérer le point de coupure de l'alimentation.
- En cas d'incendie sur une installation électrique, combattre le feu avec l'extincteur à neige carbonique, si non l'extincteur à poudre, mais n'utiliser jamais les extincteurs à mousses ou à eau pulvérisée.
- Il est dangereux et illégal de retirer la troisième borne ou broche d'une fiche polarisée.
- Un équipement électrique apparemment inoffensif peut conserver une charge mortelle, quelques fois plusieurs heures après son débranchement. De ce fait, tout technicien devrait apprendre comment employer une barre de mise à la terre.

- Pour employer une perche connecter en premier la mise à la terre puis en tenant la perche par portion isolée, toucher le point du circuit à décharger. Laisser la perche accrochée à ce point jusqu'à ce que le travail soit terminé.
- Les condensateurs et transformateurs de capacité ou inductance élevée sont particulièrement dangereux. Quand l'équipement est mis hors service, il est prudent de décharger ces éléments et tout composant ou partie de circuit pouvant conserver une charge.
- S'il n'est pas possible de garder la barre de mise à la terre en place jusqu'à ce que les réparations soient complétées, décharger les condensateurs trois fois séparément. Ne vous fiez pas toujours aux résistances de décharge car elle ne sont pas toujours efficaces.

12.8. La sécurité à l'atelier de soudage

Dans le cas du soudage autogène ou au chalumeau, sachez que l'acétylène est un gaz très combustible et forme avec l'air un mélange explosif.

- Manipuler les bouteilles avec précaution en évitant les chocs, la corrosion et l'élévation de température.
- Si vous devez utiliser les bouteilles debout, elles devront toujours être fixées avec un collier.
- Il ne faut jamais graisser les raccords de ces appareils.
- Il ne faut jamais transporter les bouteilles non munies de leur chapeau protecteur.
- Pour détecter une fuite, n'utiliser pas de flamme, mais plutôt de l'eau savonneuse.
- Les bouteilles ne doivent jamais être entreposées à proximité d'une source de chaleur.
- Avant de faire des découpages ou soudures d'un récipient ayant contenu un combustible ou explosif, il y a lieu de procéder préalablement à son dégazage.

Dans le cas du soudage à l'arc électrique, il faut savoir que l'arc émet un rayonnement dangereux. Les soudeurs et leurs voisins devront s'en protéger par des masques en très bon état car le « coup d'arc » provoque la conjonctivite qui est très douloureuse et très grave.

ANNEXES

Modèles d'imprimés supports

Concernant les équipements

Annexe N° 01 : Fiche technique

Annexe N° 02 : Nomenclature pièces de rechange

Annexe N° 03 : Fiche entretien

Annexe N° 04 : Fichier historique (Récapitulatif)

Concernant les prestations

Annexe N° 05 : Demande de travaux

Annexe N° 06 : Fiche de préparation - Ordre de travail

Annexe N° 07 : Rapport intervention

Annexe N° 08 : Fiche de suivi des principaux équipements

Annexe N° 09 : Fiche de pointage analytique du personnel

FICHE TECHNIQUE		N°:
Désignation complète de l'équipement		Code Equipement :
		Code Localisation :
		N° de plan :
		Référence plan :
Fonction de l'équipement		
Caratéristiques principales		Date de fabrication :
N° de commande :		
Constructeur :		
Type :		Date mise en service :
Modèle :		
N° de série :		
Cractéristiques techniques		
Puissance mécanique :	Alésage :	
Puissance hydraulique :	Course :	
Rendement :	Nombre de pistons :	
Mode entrainement :	Taux de compression :	
Type accouplement :	Diamètre impulseur :	
Rapport transmission :	Tension alimentation :	
Pression aspiration :	Intensité alimentation :	
Pression refoulement :	Tension de coupure :	
Pression de commande :	Tension de sortie :	
Pression de tarage :	Classe isolement :	
Température admission :	Fréquence :	
Température refoulement :		
Débit aspiration :	Poids :	
Débit refoulement :	Longueur :	
Capacité :	Largeur :	
	Hauteur :	
Références documentation		
Références constructeurs et ou Fournisseurs		

Annexe N° 02

NOMENCLATURE DES PIECES DE RECHANGE

Désignation de l'équipement	Code Equipement :
	Code Localisation :
	N° de plan :
	Référence plan :

[illegible]

Annexe N° 03

FICHE ENTRETIEN N°:

[illegible]

Annexe N° 04

FICHER HISTORIQUE (Récapitulatif)

[illegible]

DEMANDE DE TRAVAUX N° : Date :				
Désignation de l'équipement		Code Equipement :		
		Code Localisation :		
		Compte Analytique :		
		Degré d'Urgence :		
		Niveau Entretien :		
		Code Entretien :		
Etat de l'équipement				
Nature des travaux à effectuer				
Demandeur				
Service	Nom	Fonction	Date	Visa
Réceptionnée par				
Service	Nom	Fonction	Date	Visa
METHODES				
Travail à préparer par :				
Avant le :				
Observations :				

FICHE DE PREPARATION - ORDRE DE TRAVAIL N°:

Désignation de l'équipement		Code Equipement :		
		Code Localisation :		
		Compte Analytique :		
Services prestataires		Demande de travaux N° :		
		Degré d'urgence :		
Ci-joint documentation :				
Dessin équipement N°				
Procédures				
Spécifications techniques				
Pièces de rechange et outillage				
Manutention, Sécurité				
Planning main d'œuvre				
Section	Planning	Cadres	Maîtrise	Exécution
ou équipe	personnel			
Durée	Nombre			
travaux	h / H			
Préparation effectuée par				
Service	Nom	Fonction	Date	Visa
Date début travaux :				
Date fin de travaux estimée :				
Observations et consignes particulières :				
Ordonancement				
Service	Nom	Fonction	Date	Visa

RAPPORT INTERVENTION N°				
Désignation de l'équipement			Code Equipement :	
			Code Localisation :	
			Compte Analytique :	
			Degré d'Urgence :	
Demande de travaux N° :			Ordre de travail N° :	
Situation de l'équipement avant intervention				
Date début travaux :			Date fin travaux :	
Résumé succinct des travaux				
Moyens humains				
Nom	Prénom	Qualité	Heures	Observation
Moyens matériels et supports utilisés				
Désignation	Code	Quantité	Carburant	Observation
Pièce de rechange et ingrédients consommée				
Désignation	Référence	Code	Quantité	Observation
CI-joint : 1. Détails des phases d'intervention				
2. Remarques, recommandations et suggestions				
Responsable de l'opération				
Nom	Prénom	Qualité	Date	Visa

FICHE ANALYTIQUE DU PERSONNEL

Journée du :

[illegible]

BIBLIOGRAPHIE

1. La fiabilité en mécanique
J.C. Ligeron
Edition Desforges 1979
2. Vers le zéro panne avec la maintenance conditionnelle
Alain Boulenger
Collection "Guides de l'utilisateur" Edition AFNOR 1989
3. Guide de la maintenance
Daniel Boitel et Claude Hazard
Edition Nathan 1990
4. Maintenance conditionnelle, mesures et analyses des vibrations
Jean Lois Feron
Polycopié, Edition de l'IUT de Saint Nazaire 1993
5. Réussir sa maintenance, Eléments de réflexion
Rédigé par un Groupe de réflexion et d'orientation en maintenance
Edition Mare Nostrum 1996

Achevé d'imprimer sur les presses de

**L'OFFICE DES PUBLICATIONS
UNIVERSITAIRES**

1, Place Centrale - Ben-Aknoun - ALGER

EDITION: 2.05.4463
I.S.B.N : 9961.0.0565.1

Prix: 180 DA T.T.C

LA MAINTENANCE INDUSTRIELLE

S. BENSADA D. FELTACHI

O.P